

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**

№ 2'2020

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 2'2020

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Kharkiv
NTU "KhPI", 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении = 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», 2020 — № 2. — 101 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. The edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 24359-14199Р від 10 лютого 2020 р.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), 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"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Пермяков О.О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Анділахай О.О., д-р техн. наук, проф., ПНТУ, Україна
Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Воронцов Б.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Гасанов М.І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Доброворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Дмитрієв Д.О., д-р техн. наук, проф., ХНТУ, Україна
Драган Перакович (Peraković, Dragan) -PhD, полный профессор,
Университет Загреб, Хорватия
Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна
Кане М.М., д-р техн. наук, проф., Білоруський НТУ, Білорусь
Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна
Ларшин В.П., д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Україна
Мироненко С.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна
Набока О.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Михел Балол (Балог, Михал), доцент, доктор філософії,
Технічний університет Кошице, Словаччина
Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна
Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ
«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна
Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Ступницький В.В., д-р техн. наук, проф., Львівська
«Політех», Україна
Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна
Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Associate editor:

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

Editorial staff members:

Andilakhai O.O., professor, PNTU, Ukraine
Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Vorontsov B.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Hasanov M.I., professor, NTU "KhPI", Ukraine
Dobrotvorsky SS, professor, NTU "KhPI", Ukraine
Dmitriev D.O., prof., KhNTU, Ukraine
Dragan Perakovich -PhD, full professor,
University of Zagreb, Croatia
Kalchenko V.V., professor, ChNTU, Ukraine
Kane M.M., professor, Bilorusky NTU, Bilorus
Klochko O.O., prof. NTU "KhPI", Ukraine
Kovalov V.D., professor, DDMA, Ukraine
Larshin V.P., prof., ONPU, Ukraine
Mironenko B.V., professor, DDMA, Ukraine
Naboka O.V., Ph.D. sciences, NTU "KhPI", Ukraine
Michel Ballol, Associate Professor, Doctor of Philosophy,
Technical University of Kosice, Slovakia
Pasichnik V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Stalinsky D.V., prof., DP UkrSTC
ENERGOSTAL, Ukraine
Stepanov M.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine
Stupnitsky V.V., prof., Lvivska Politeha, Ukraine
Fadecv V.A., professor, PAT "FED", Ukraine
Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 4 від 3 липня 2020р.

GASANOV M., PERMYAKOV A., KLOCHKO A., SHELKOVY A.

NEW STRENGTH FOR RECOVERY OF GEARED CIRCLES

The subject matter of the research is issues related to the optimization of the technology for reconditioning large-size high precision gear rims of the drives of mining complexes, mine lifting equipment, heavy vehicles; these issues are a perspective trend for reducing the cost of reconditioning and operation of expensive unique equipment. **The goal** is to ensure intensifying production processes, increasing workloads and speeds, reducing the deterioration of high precision gear rims. **The objective** is to develop a new technology to optimize reconditioning large high precision gear rims. To achieve this, the following **method is suggested** – to machine gear rims after they have been surfaced by pre-milling with special hob cutters with a prominence and by final machining the teeth with special cutters equipped with hardmetal inserts that process teeth along the line of engagement, which does not require making full-length cutting teeth and increases the quality of machining, the durability of hardmetal milling cutters. The following **results** are obtained. **Conclusions.** The technology for the optimization of reconditioning large high precision gear rims with the use of special and universal hardmetal single- and double-flute cutters that have both re-sharpened cutting elements and disposable rotary tools was developed and introduced.

Keywords: new optimization technology, reconditioning large gear rims, high precision, hob cutters with a protuberance, special cutters, machining tooth along the line of engagement, improving the quality of machining.

ГАСАНОВ М.И., ПЕРМЯКОВ А.А., КЛОЧКО А.А., ШЕЛКОВОЙ А.Н.
НОВАЯ СТРАТЕГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ

Предметом исследования являются вопросы, связанные с оптимизацией технологии восстановления крупногабаритных высокоточных зубчатых колес приводов горных комплексов, шахтного подъемного оборудования, тяжелых транспортных средств; Эти вопросы являются перспективной тенденцией снижения затрат на восстановление и эксплуатацию дорогостоящего уникального оборудования. Цель состоит в том, чтобы обеспечить интенсификацию производственных процессов, увеличение рабочих нагрузок и скоростей, снижение износа высокоточных зубчатых колес. Цель состоит в том, чтобы разработать новую технологию для оптимизации восстановления больших высокоточных зубчатых колес. Для достижения этой цели предлагается следующий метод - обрабатывать зубчатые колеса после их обработки путем предварительной фрезерования специальными фрезами с выпуклым выступом и окончательной обработки зубьев специальными фрезами, оснащенными твердосплавными пластинами, которые обрабатывают зубья по линии зацепления, которое не требует изготовления полноразмерных режущих зубьев и повышает качество обработки, долговечность твердосплавных фрез. Получены следующие результаты. Выводы. Была разработана и внедрена технология оптимизации восстановления больших высокоточных зубчатых колес с использованием специальных и универсальных твердосплавных одно- и двух-канавочных резцов, которые имеют как заточенные режущие элементы, так и одноразовые вращающиеся инструменты.

Ключевые слова: новая технология оптимизации, восстановление больших зубчатых колес, высокая точность, фрезы с выпуклостью, специальные фрезы, обработка зубьев по линии зацепления, повышение качества обработки.

ГАСАНОВ М.І., ПЕРМЯКОВ О.А., КЛОЧКО О.О., ШЕЛКОВОЙ О.М.
НОВА СТРАТЕГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ ВІНЦІВ

Проводити дослідження, що стосуються питань, пов'язаних з оптимізацією технологій встановлення великих великобудівних високоточних зубчастих колесів, що приносять гірські комплекси, шахтного підключення обладнання, тяжких транспортних середніх; Ети питання пропонують перспективну тенденцію зменшення затрат на відновлення та експлуатацію дорогого унікального обладнання. Це може бути реалізовано в тому, щоб забезпечити інтенсивну ефективність виробничих процесів, збільшення робочих навантажувачів і скоростей, зменшення виносності високих зубчастих колесів. Ціль міститься в тому, щоб розробити нову технологію для оптимізації встановлення найбільших високоточних зубчастих колесів. Для досягнення цього цілого пропонується наступний метод - обробити зубчасті колеса після їх обробки путем передвірної фрезерування спеціальними фрезами з випускним выступом і кінцевою обробкою зубчими особливими фрезами, оснащеними твердими пластичними пластинами, які розробляються в лінійці, що потрібна обробки, довговечність твердосплавних фрез. Отримані наступні результати. Виводи. Будучи розробленими та вбудованими технологічними оптимізаціями, відтворені великі високі високоточні зубчасті колеса із застосуванням спеціальних та універсальних твердосплавних одно- та двоканальних каналів, які мають як заточені нові елементи, так і одноразові вражаючі інструменти.

Ключові слова: нова технологія оптимізації, відтворення великих зубчастих колесів, висока точність, фреза з випускництвом, спеціальні фрези, обробка зуб'єв за лініями вибірки, підвищення якості роботи

1. Introduction. The performance of mining complexes, mine lifting equipment, heavy vehicles is gradually getting worse due to the deterioration of their equipment in the process of operation. Among them, there are large high precision gear rims. Such large gears can have failures and malfunctions that are fixed in the course of various types of reconditioning and repairing activities. To ensure high-quality recovery, a new technology for the optimization of reconditioning large high precision gear rims is suggested.

The service life of fast-wearing large gear trains determines the prove-in performance of expensive machines. Stopping equipment to replace worn large gear trains with new ones leads to a significant decrease in labour productivity, disrupts the rhythm of the production process, causes non-productive metal costs to

manufacture new parts and results in the need for special maintenance teams.

2. Analysis of literary sources and problem statement. Modern trends in intensifying of production processes, increasing workloads, speeds, temperatures lead to faster deterioration of parts, and along with the need for production automation, give points to the problem of increasing the service life of quickly deteriorated machine parts [1, 4, 7, 9], so most of the parts that are connected with other parts wear out fast. This process results in material damage when the material scales off the solid surface and its friction strain accumulates. These phenomena lead to a gradual change in the size and shape of a part. The techniques for reconditioning the parts and joint connections are resource-saving, as compared to the manufacture of new

parts, the costs for materials in manufacturing are significantly reduced, a number of technological operations is decreased, the costs for machine tools, devices, cutting and measuring equipment as well as for labour remuneration of workers are reduced [2, 3, 5, 10]. A part that has toothed surfaces is known to be under cyclic and dynamic loads while operating, which leads to the damage of working surfaces. The smooth operation of the gear train can be ensured only at a constant gear ratio but due to manufacturing and operation errors, for example, the deformation of teeth, the gear ratio does not remain constant at every time [6, 8, 11]. Moreover, dynamic loads or interference generate an additional negative impact. The deformation of gear wheels, as well

as manufacturing errors lead to uneven distribution of the load across the width of the gear rim.

When the worn-out teeth are repaired by surfacing, the worn side of each tooth is surfaced when the gear wheels are of a large diameter (up to 15 m) and a module is of more than 10 mm. High wear resistance and durability of the faced surfaces of teeth can be ensured by using the alloys of sormite and stellite types. A thin coat of sormite is spread on the surface firstly faced with a filler material and roughed up (Fig. 1). After surfacing with sormite, the teeth are firstly milled with special hob cutters with a prominence and finally machined with special cutters with hardmetal inserts [1, 2, 3].



Fig. 1 – Worn large gear wheels: a) a worn cylindrical gear wheel; б) a worn cylindrical gear wheel surfacing

When operating large cylindrical gear trains, the following types of tooth fracture occur: fatigue spalling of the teeth working surfaces, chipping of the teeth, deterioration, binding of teeth, crushing of the teeth working surfaces. Fatigue spalling of the teeth working surfaces which usually occurs near the operating pitch circle on a tooth root fillet is the main type of destruction of enclosed gears. The cause is variable contact pressures

on the surface of the teeth σ_H ; these stresses cause primary cracks, extending cracks, chipping, shelling, slivering of metal from the tooth surface (Fig. 2) [7]. A crack at the tooth root often causes chips which results in the increase in the contact pressure and the disruption in the tooth gearing [4, 5, 6, 7, 12]. Surface layers in open gears abrade before fatigue cracks appear in them, so spalling happens very rarely.



Fig. 2 – Chips cut by the finishing cutter ($m=20$ mm) without teeth cutting by a cutter with a prominence

3. The goal and objectives of the research The goal and objectives of the research are to ensure intensifying production processes, increasing workloads, speeds, reducing the deterioration of high precision gear rims and developing a new technology to optimize the recovery of large high precision gear rims. To achieve this, a method for machining teeth after surfacing by pre-milling with special hob cutters with a protuberance and by final machining the teeth with special cutters equipped with

hardmetal inserts that machine teeth along the line of engagement, which does not require that cutting teeth of milling cutters be manufactured along the full length and which significantly improves the quality of machining, increases the durability of hardmetal milling cutters.

To carry out research, a structurally logical diagram of the process was developed to optimize the technology for restoring large-sized gear rims of increased accuracy (Fig. 3).

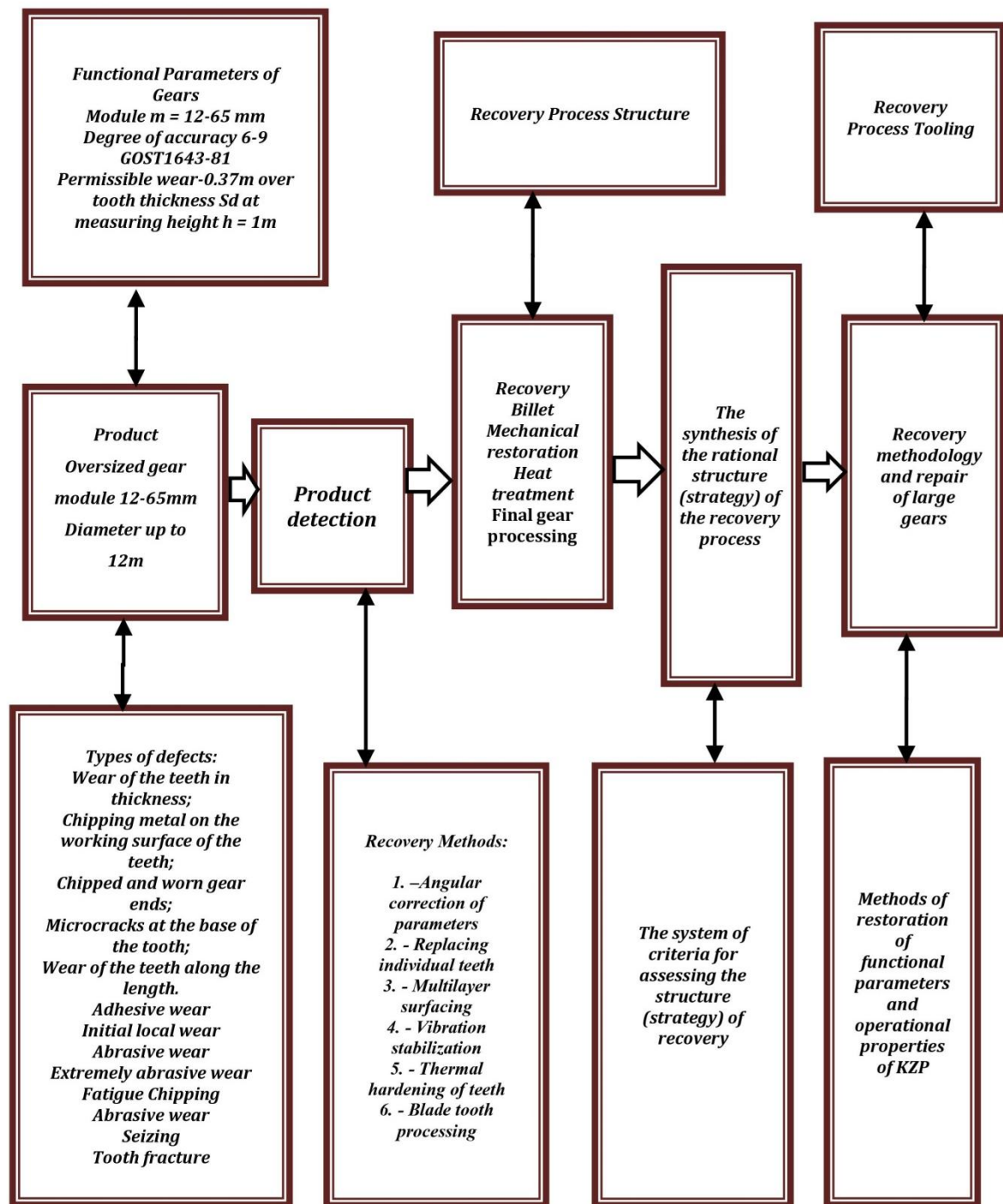


Fig. 3 – The structural-logical scheme of the dissertation of the process optimization of the technology for the restoration of large-sized gear rims of increased accuracy

A new technology for reconditioning large high precision cylindrical gears is suggested, where primary rough milling cutters with a modified face of a tooth with a prominence are used at the stage of pre-machining of the wheel teeth for strengthening and final speedy edge cutting machining of the tooth [7, 8].

For this purpose, the tip of a milling cutter (Fig. 4, a) has a tooth angle that differs from the standard one which is $\alpha_0 = 20^\circ$ near the tooth tip and the tooth thickness is reduced by the allowance amount Δ which is necessary for further final machining (Fig. 4, b). The required allowance Δ is left on the wheel teeth flanks after

machining by this milling cutter (Fig. 4, b), while teeth inverts are machined adequately. The fact that the tips of a finishing tool, for example, tips of a grinding wheel, do not participate in cutting the inverts improves the process of cutting. Radial forces of cutting are reduced, vibration and springing of a tool decrease and, subsequently, its durability increases as well as the quality of the machined teeth.

The drawback of milling cutters with a prominence is the lowered angle ($\alpha_3 = 1,5^\circ - 2^\circ$) on the tooth flank due to relieving work

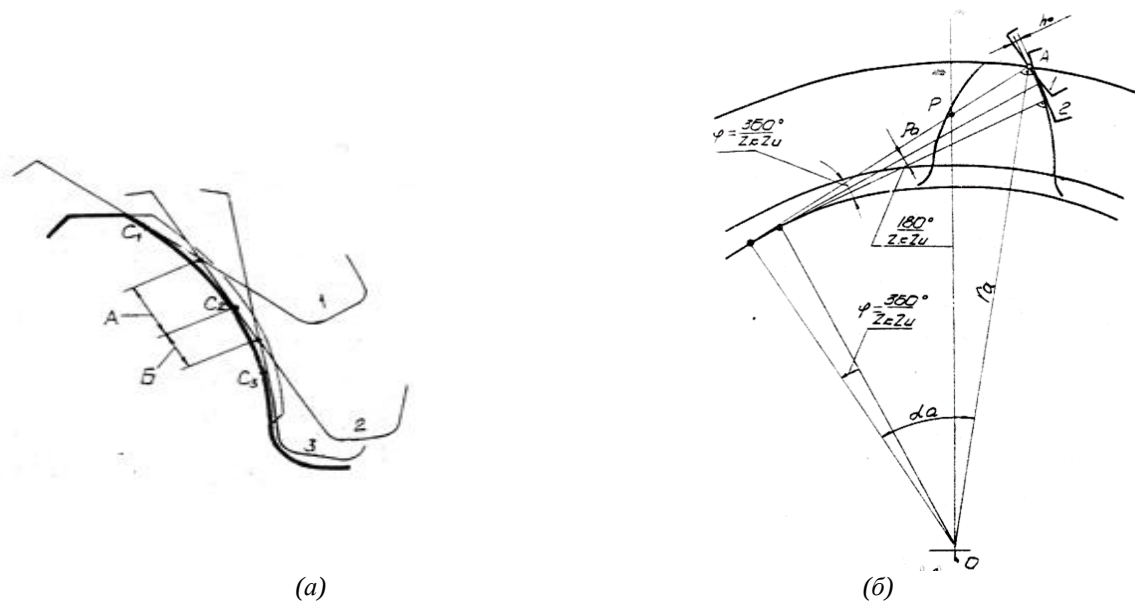


Fig. 4 – Wheel teeth precutting: a – a tooth of hob cutter with a prominence; b – a wheel tooth machined with Δ allowance; h_n – the prominence height, α_0 – the angle of original profile, α_n – the angle of prominence profile

The developed technique of pre-machining on the teeth of a large module ($m=20-25$ mm) was successfully tested for the first time while gear cutting the worn but reconditioned large gear rim with the following dimensions – $D_a=8058$ mm, $m=28$ mm; $z_k=284$; $\beta_0=6^\circ 25'$; $b_3=1000$ mm, produced of 35XMI steel; 220-260 HB; the precision rate is 8-B GOST1643-81, which is used in the ore-pulverizing mill (Fig.5) of MB 90x30 model.

Gear hobbing was done by a special heavy vertical gear hobbing machine of KV-306 model with the

diameter of the operating face plate equal to 8000mm. The fast-cutting hob cutter “Progress” was used for rough teeth cutting [7, 8, 9]. This cutter has an elongated starting taper ($l_k=350$ mm) and an expanded tool bore – $\phi 100H7$. According to the diagram given in Fig.1(a), a prominence is made on the teeth of a milling cutter (Fig.4); the teeth have complete profile heightwise. There are chip control flutes on the teeth of the starting taper, which enables separating box chips, i.e. escaping the space-limited cutting. This improves the tool durability.

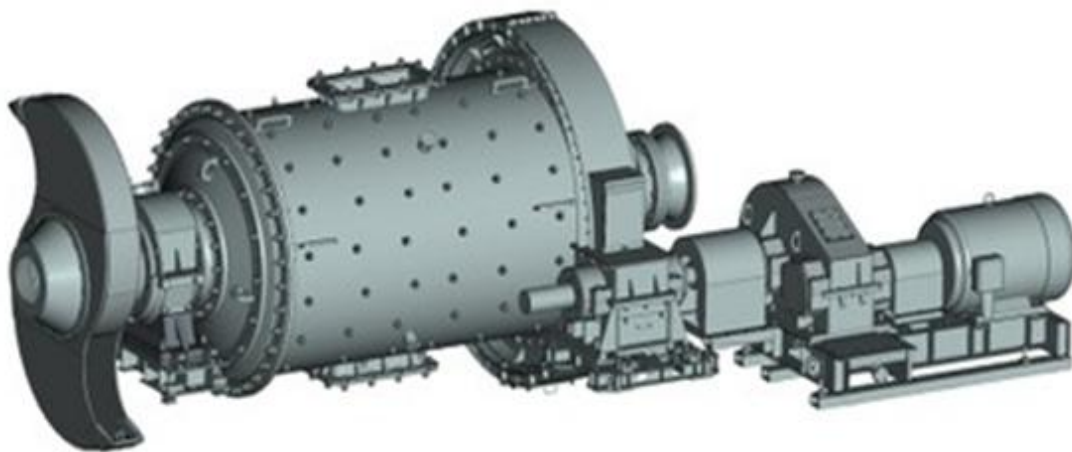


Fig. 5 – The general view of the ore-pulverizing mill of MB 90x30 model with the reconditioned gear rim with the following dimensions $m=28$ mm; $z_k=284$, $D_a=8058,4$ mm

The rough cutting modes were as follows: cutter feed $S_\phi=2,5$ mm/r; rotary velocity $n_\phi=0,2$ sec⁻¹; the cutting direction is counter, metal cutting oil is “Industrial-20”. The machining time of rim cutting in one operation was 110 hours.

For reference: the time for machining this rim by other cutters, for example, by the “Frezer” plant is 350

hours.

The special hob cutter $m=28$ (Fig.6) was used for teeth finish machining in one operation, this cutter has hardmetal inserts made of BK 10-XOM alloy [7, 9, 10].

The cutting direction was counter, the cutting modes – $t=0,6$ mm, $S_\phi=3,86$ mm/r; $n_\phi=0,33$ sec⁻¹.

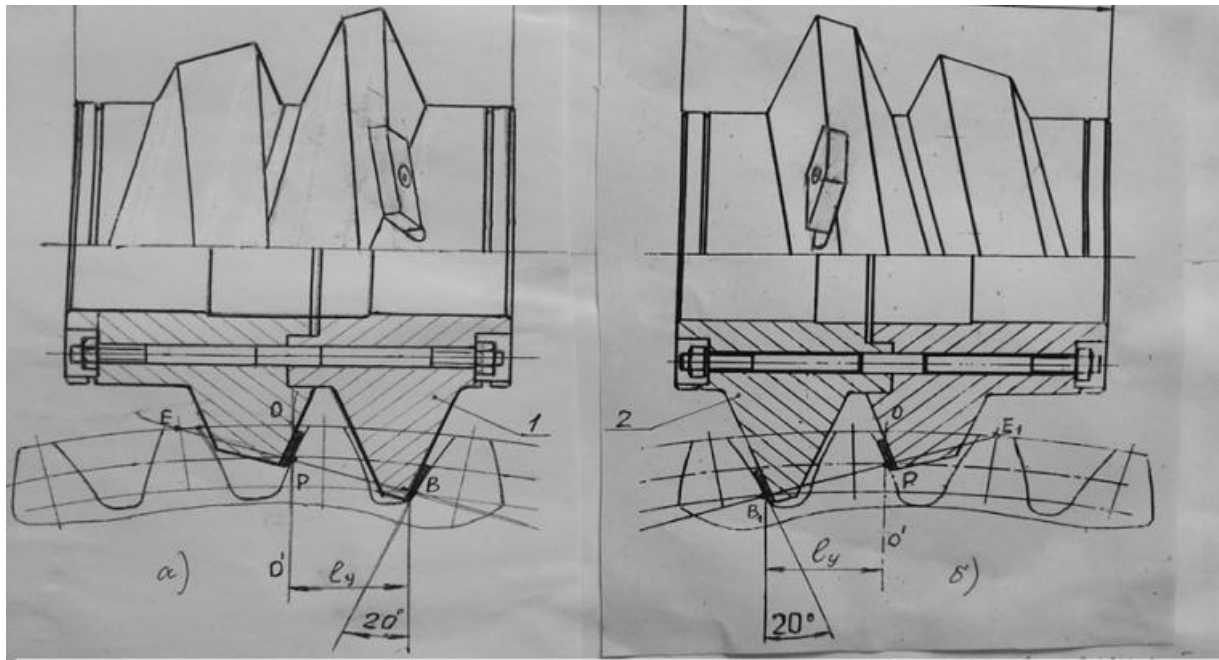


Fig. 6 – Special double hob cutter for two-way cutting ($m=28\text{ mm}$); $\alpha\phi=19^\circ20'$.
1-cutter housing; 2- distance ring

The machining time for finishing the rim was 65 hours. The maximum wear of the individual teeth of the milling cutter after this continuous working time did not exceed 0.3 mm, which is 4-5 times less than in the case of similar machining with high-speed cutters. The fact that the difference in the thickness of the teeth of the machined rim at the upper and lower ends ($l_3 = 1000\text{ mm}$) did not exceed 0.06 mm indicates the high durability of the cutter. The measurement of the precision parameters of the cut teeth with attachable devices showed that the gear

corresponds to the 8th degree of precision in accordance with GOST 1643-81 in the context of the deviation of the circumferential pitch of the teeth and the pitch of the engagement.

4. Materials and methods of the research. The technique of rough and finishing teeth machining after the teeth (Fig.5) of large rims were reconditioned by rough cutters “Progress” with a prominence and a hardmetal finishing cutters (Fig.6) of a special design was introduced at PrAT “NKMZ”.

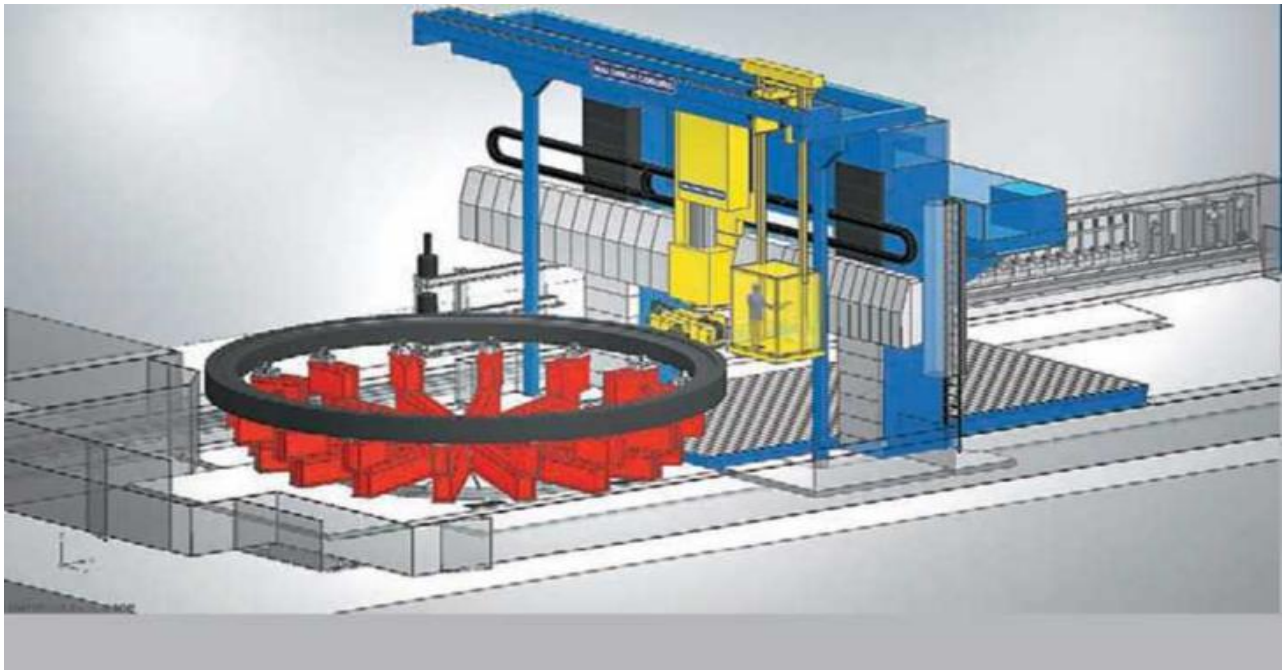


Fig. 7 – Finish cutting the rim teeth ($m=20\text{ mm}$; $Z_k=268$; $\beta_3=5^\circ15'$; $b=700\text{ mm}$; 140... 160 HB) using the machine of HHA-750 model (Japan)

The vertical gear hobbing machine of HHA-750A model manufactured by the firm "Shibaura" (Japan) (Fig. 7) was used for machining by counter milling with the use of metal cutting oil is "Industrial-20". The rim with the following parameters $m = 20$ mm; $Z_k = 268$; $\beta_3 = 5^\circ 15'$; $b = 700$ mm; 35JIII steel; 140-160 HB was finished in one operation under the following modes of cutting – $t = 0,9$ mm; $S_\phi = 4,72$ mm/r; $n_\phi = 0,5$ sec⁻¹; $V_{pe3} = 32$ m/min.

The machining time for finishing one rim is 24 hours, which is by 1.8 times less than while machining by a high-speed cutter (Fig.8) (STP 4-15-70).

Fig. 9 shows chips cut during finishing of teeth with

a high-speed cutter without rough cutting by a cutter with a prominence. Most of the teeth of a finishing milling cutter cut the box chips; there is the space-limited cutting. In this case, the perimeter of the chips is approximately equal to half the perimeter of the wheel tooth which is 45-48 mm when the tooth module $m = 20$ mm. The tips of the individual teeth of the milling cutter cut thickened chips from the bottom of the tooth groove (Fig. 9, the upright row), which raises the radial cutting forces and leads to vibrations and springing of the tool, increases the wear of the teeth (Fig.10).

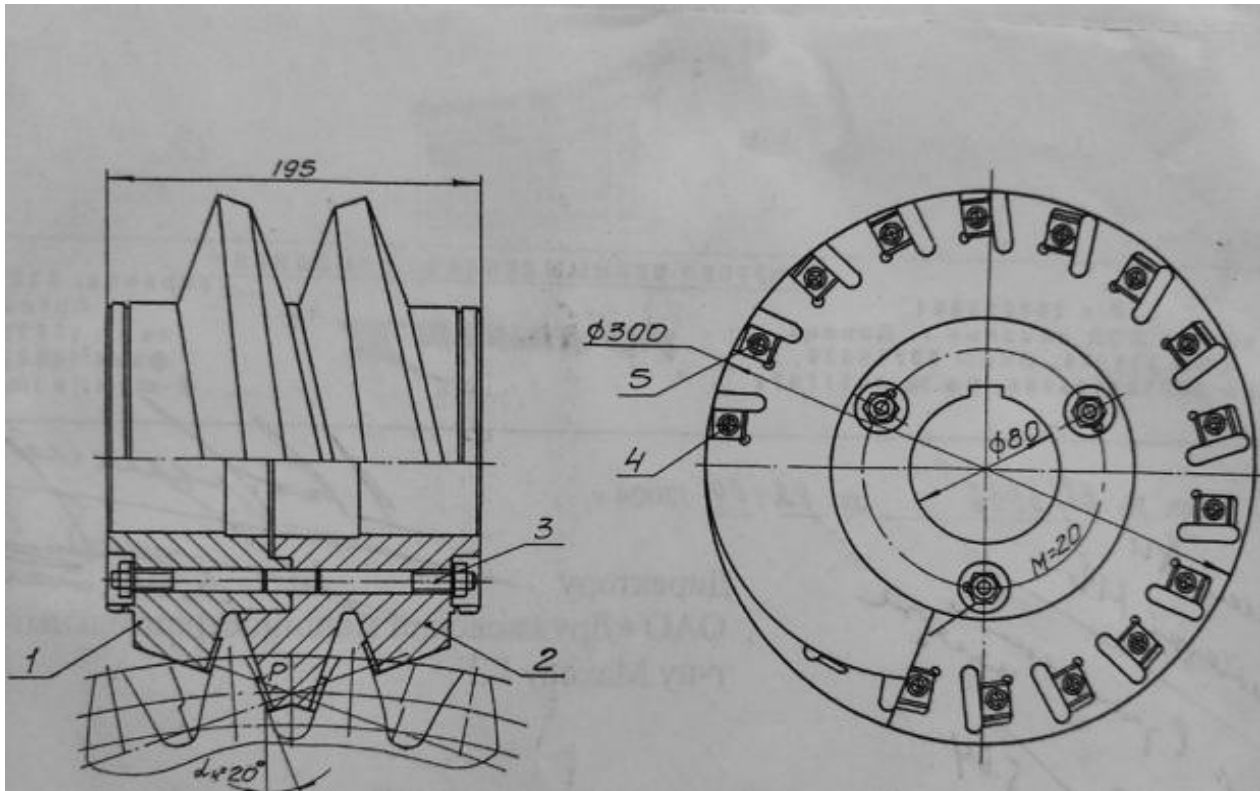


Fig. 8 – Finishing hardmetal hob cutter ($m = 20$ mm)

There are no box chips and the length of the chips does not exceed 10-16 mm while the length of the tooth cutting edge of the milling cutter is 20 mm. The length of the teeth cutting edge of the teeth in the developed designs of milling cutters does not exceed 20 mm and is the same for the modules with $m = 12-65$ mm. In this case, a number of teeth of the cutter is by 1.5-2 times greater than the milling cutters of other designs have.

Chips (Fig. 11) are compactly twisted, and their backside is shiny, which indicates a free cutting process, minor efforts and deformations in the SPEED system.

Hardmetal hob cutters with $m = 12 - 65$ mm (Fig. 12) that have disposable rotary tools made of BK 10-XOM alloy were designed to improve the milling cutter.

Under the factory conditions at the PrAT "NKMZ", hardmetal hob cutters with disposable rotary tools were designed and calculated by modelling and a solid model was obtained on SOLID WORKS programme. The control programme was further developed for machining

grooves for inserts that are tangentially placed using a numerically controlled machine tool manufactured by the firm "Ferrari" (Italy). The machining time for cutting the grooves of a cutter housing is $T_{mach} = 16-20$ hours.

Finishing the teeth of the worn and conditioned large gear rims can be further intensified by increasing the lobe configuration of hob cutters.

While gear machining, long-pitch multi-thread hob cutters ($m > 12$) of the standard design were not spread due to manufacturing complexity,

The designs of double-flute hardmetal hob cutters suggested in this work allow them to be used for machining the worn and conditioned large gear rims with the tooth module with $m = 12-40$ mm.

5. The results of the research. When a wheel is machined by a milling cutter with a number of teeth that is divisible by two, only a half of the wheel teeth can be fully machined in one operation. Therefore, after the first operation of the tool, the wheel should be rotated by one

angular pitch of the teeth and one more operation should be performed.

The design parameters of hob cutters, especially multi-flute ones, significantly affect the quality and precision of machining gears. In this regard, such parameters as faceting and waviness of the working involute flanks of the teeth are considered. Both the studied above designs of double-flute cutters and single-flute standard cutters of known designs ensure the same faceting and waviness on the wheel teeth flanks. 0.6-0.8 rotation of each flute is engaged in profiling the involute flank of the wheel teeth by double-flute milling cutters, while in the context of single-flute cutters 1.2 - 1.8 rotation are needed; however, the suggested double-flute cutters have a number of teeth placed along the rotation circuit that is twice as much.

The amount of calculated or geometrical waviness on the processed surface of the wheel teeth is calculated by a set of design parameters of the cutter and a workpiece that is machined, that is by the profile angle of the cutter, its dimensions, the helix angle of the wheel teeth and so on. To determine the magnitude of the geometric waviness, the equation of the path of the tooth cutting edge point of a hob double-flute cutter in relative motion can be used. The waviness parameter h_c on the machined surface of the wheel teeth can be determined by the coordinate of the point of intersection of the two projections of the cutter tooth path that are shifted relative to one another by the amount of the tool feed S . The initial dependence for determining the wave height h_b is:

$$h_b = 2r_k \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \sin \frac{\gamma}{2} - r_\phi \sin \gamma \sin \beta_y, \quad (1)$$

where r_k is the radius of the rotation of a wheel tooth point adjacent to the corresponding point of the cutter tooth; r_ϕ is the radius of the rotation of the target point on the cutter tooth; β is the central angle corresponding to the distance from the machine axis to the target points of the pair "tool – workpiece"; γ is the target angle of the wave formation; β_y is the angle of bringing a cutter in the machine support into operation position.

Conclusions. Industrial confirmation of The possibility and expediency of using hob cutter with a prominence ($m = 20-28$ mm) while rough cutting of worn and reconditioned large gear rims were proved industrially. To obtain the required durability of roughing milling cutters, it is recommended that the angle of the prominence profile be set at $8^\circ - 10^\circ$.

The use of hardmetal hob cutters for finishing enables increasing the performance rate by 2 to 3 times in comparison with high-speed cutters of other designs and makes it possible obtain the required quality and precision of manufacturing worn and reconditioned large gear rims.

The technology of optimization of reconditioning large high-precision gear rims with the use of the design of special and universal hardmetal single- and double-flute cutters with both re-sharpened cutting elements and with disposable rotary tools turn plates was developed and introduced.

References

- Klochko, A., Shelkovoy, A., Shapovalov, V., Belovol, A., Antsyferova, O. (2017), "Technology of repair and restoration of large-modular hardened gears by high-speed blade processing". Innovative Technologies & Scientific Solutions for Industries. Kharkiv. No. 2 (2). P. 38–47.
- Kovalev, V., Shelkovoy, A., Klochko, A. (2017). "Technological solutions of the stationary task of working liquids for increasing the durability of gear wheels of the main drives of heavy turning machines". The current state of scientific research and technology in the industry. Kharkiv No. 1 (1). P. 36–45.
- Belovol, A., Klochko, A., Naboka, E., Skorkin, A., edited by A. Shelkovoy (2016), *Imitation modeling in problems of machine-building production in 2 volumes*, T. 1: study. Allowance Kharkiv NTU "KhPI". 400 p. ISBN 978-966-593-749-4.
- Shelkovoy, A., Klochko, A., Hasanov, M. (2017), "Maintenance of operational properties of hardened gears". Bulletin of modern technologies: Sat. scientific tr Sevastopol: FSUE "Sevastopol State University". Issue 8. P. 61–70.
- Shelkovoy, A., Permyakov, A., Novikov, F., Voloshin, A., Klochko, A., Hasanov, M. (2017), "Actuality of differentiated and integrated forecasting in conditions of simulation of technological support of operational properties of surfaces of large-sized gear wheels". Physical and computer technologies. Proceedings of the 23rd International Scientific and Practical Conference. December 21-22, 2017, Kharkov. Odessa: ONPU. P. 36–41.
- Kapelevich, A.L. *Direct Gear Design*. CRC Press, 2013
- Permyakov, A., Shelkovoy, A., Klochko, A., Okhrimenko, A. (2017), «Modern technologies of increasing durability of cylindrical gears». XVII International Scientific and Technical Conference "Progressive Technology, Technology and Engineering Education", which took place June 29-July 01, 2017, at the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: NTUU "KPI". T. 4. P. 348–350.
- Starzhinsky, V., Soliterman, Yu., Tesker, E., Goman, A., Osipenko, S. (2008), "Types of damage to gears: typology and recommendations for the prevention of damage", Friction and wear. Gomel. T. 29. № 5. P. 465–482.
- Kapelevich, A. L., A. I. Tolchenov and A. I. Eidinov. 1985. *Application of the fly cutters in experimental production*, Aviatsonnaya Promyshlennost. #3. 39-40.
- Kapelevich, A. L., Y. V. Shekhtman and T. M. McNamara. 2005. *Turning an Art into Science*. Motion System Design. August: 26-31.
- Mironenko, E., Shapovalov, V., Klochko, A., Palashek, S., Ostapovich, E. (2015), "Design and technological methods of increasing the productivity and quality of the tooth processing of large-sized gears. Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Mechanical Engineering. Kh.: NTU "KhPI". No. 4 (1113). P. 28–32. ISSN 2079-004X.
- Timofeev, Yu., Shapovalov, V., Klochko, A. and others. (2011), *Special technologies of zebot machining of large-modular hardened wheels*: monograph. Kramatorsk: DGMA. 128 p.
- Timofeev, Yu., Kane, Yu., Klochko, A., Shapovalov, V. and others. (2014), *Technological bases of a toothprocessing of hardened large-modular gear wheels*: a monograph. Kramatorsk, DHSA. 479 p.
- Mironenko, E., Klochko, A., Shapovalov, V., Chmyrov, V. (2013), "Perfection of the technology of a toothbrush by worm modular cutters with contact-reactive soldering of cutting plates". Reliability of the tool and optimization of technological systems: ser. scientific tr Kramatorsk: DGMA. Issue 33. P. 3–7.
- F.W. Brown, S.R. Davidson, D.B. Hanes, D.J. Weires, and A. L. Kapelevich, 2010, "Analysis and Testing of Gears with Asymmetric Involute Tooth Form and Optimized Fillet Form for Potential Application in Helicopter Main Drives", AGMA Fall Technical Meeting, Milwaukee, Wisconsin, October 18-19, (10FTM14)
- Suslov, A., Klochko, A. (2016), "General principles of modeling of optimal control of parameters of accuracy, quality and productivity of tooth processing of hardened large-modular

gears". Problems of designing and automation in mechanical engineering. Collection of scientific works. Scientific and Production Cooperative "Oniks". Irbit: NPK ONIS. P. 105–119. ISBN 978-5-906703-10-1.

Поступила (received) 15.05.2020

About the Authors / Відомості про авторів / Сведения об авторах

Hasanov Magomedemin (Гасанов Магомедємін Ісамагомедовіч, Гасанов Магомедэмин Исамагомедович,) – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків;; тел.: (096)-590-8850; e-mail: kh.kajvika@gmail.com;

Permyakov Alexander (Пермяков Олександр Анатолійович, Пермяков Александр Анатольевич) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верста-тів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Klochko Alexander (Клочко Олександр Олександрович, Клочко Александр Александрович) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455;

Shelkovoy Alexander (Шелковой Олександр Миколайович, Шелковой Александр Николаевич) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (050) 945-28-93; e-mail: alnikshelk@gmail.com, ORCID:0000-0002-7414-4854.

НОВИКОВ Ф. В.**ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Предложен теоретический подход к определению упругими перемещениями, возникающими в технологической системе при шлифовании. Получены аналитические зависимости для определения упругих перемещений, возникающих на переходах шлифования и выхода. Это позволило определить основное время обработки, необходимое для достижения заданного значения точности обработки. Установлено, что наименьшее основное время обработки при заданной точности обработки достигается при условии съема всего припуска лишь по схеме выхода, исключая переход чистового шлифования. При этом в технологической системе необходимо создать начальный натяг, равный или кратный величине снимаемого припуска. Эффект данной схемы обработки состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки. Основными ограничениями применения данной схемы являются обеспечение высокой режущей способности шлифовального круга и создание увеличенного начального натяга в технологической системе. Поэтому в данных условиях на практике следует основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента, а оставшуюся небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме выхода. Установлено, что при обработке по данной схеме наибольшее влияние на основное время обработки оказывает степень затупления режущих зерен круга. С увеличением остроты режущих зерен круга основное время обработки уменьшается, обеспечивая заданную точность обработки с большей производительностью. Следовательно, при обеспечении высокой режущей способности шлифовального круга можно удалять значительные припуски по данной схеме выхода, исключая переход шлифования и увеличивая производительность при обеспечении заданной точности обработки.

Ключевые слова: точность и качество обработки, производительность обработки, основное время обработки, выход, начальный натяг, шлифовальный круг.

НОВИКОВ Ф. В.**ЗАКОНОМІРНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРУЖНИМИ ПЕРЕМІЩЕННЯМИ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ
ПРИ ШЛІФУВАННІ**

Запропоновано теоретичний підхід до визначення пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при шліфуванні. Отримано аналітичні залежності для визначення пружних переміщень, що виникають на переходах шліфування і виходжування. Це дозволило визначити основний час обробки, необхідний для досягнення заданого значення точності обробки. Встановлено, що найменший основний час обробки при заданій точності обробки досягається за умови знімання всього припуску лише за схемою виходжування, виключаючи перехід чистового шліфування. При цьому в технологічній системі необхідно створити початковий натяг, рівний або кратний величині припуску, що знімається. Ефект даної схеми обробки полягає в забезпеченні максимально можливої продуктивності для заданої точності обробки. Основними обмеженнями застосування даної схеми є забезпечення високої ріжучої здатності шліфувального круга і створення збільшеного початкового натягу в технологічній системі. Тому в даних умовах на практиці слід основну частину припуску видаляти за жорсткою схемою із заданою радіальною або поздовжньою подачею інструменту, а решту – невелику частину припуску – за розглянутою схемою виходжування. Встановлено, що при обробці за даною схемою найбільше впливає на основний час обробки ступінь затуплення ріжучих зерен круга. Зі збільшенням гостроти ріжучих зерен круга основний час обробки зменшується, забезпечуючи задану точність обробки з більшою продуктивністю. Отже, при забезпеченні високої ріжучої здатності шліфувального круга можна видаляти значні припуски за даною схемою виходжування, виключаючи перехід шліфування і збільшуючи продуктивність при забезпеченні заданої точності обробки.

Ключові слова: точність та якість обробки, продуктивність обробки, основний час обробки, виходжування, початковий натяг, шліфувальний круг.

NOVIKOV F. V.**REGULARITIES OF MANAGEMENT OF ELASTIC MOVEMENTS IN THE TECHNOLOGICAL SYSTEM AT GRINDING**

A theoretical approach to determining the elastic displacements that occur in a technological system during grinding is proposed. Analytical dependences are obtained for determining the elastic displacements arising at the transitions of grinding and nursing. This made it possible to determine the main processing time necessary to achieve the required value of processing accuracy. It has been established that the smallest main processing time for a given processing accuracy is achieved provided that the entire allowance is removed only according to the nursing scheme, excluding the transition to finish grinding. In this case, in the technological system it is necessary to create an initial interference equal to or a multiple of the size of the removed allowance. The effect of this processing scheme is to provide the highest possible productivity for a given processing accuracy. The main limitations of the application of this scheme are to ensure high cutting ability of the grinding wheel and the creation of an increased initial interference in the technological system. Therefore, in these conditions, in practice, the main part of the allowance should be removed according to a rigid scheme with a given radial or longitudinal feed of the tool, and the remaining small part of the allowance should be removed according to the nursing scheme under consideration. It was established that during processing according to this scheme, the degree of bluntness of the cutting grains of a circle has the greatest influence on the main processing time. With an increase in the sharpness of the cutting grains of the circle, the main processing time decreases, providing a given processing accuracy with greater productivity. Therefore, while ensuring a high cutting ability of the grinding wheel, it is possible to remove significant allowances according to this nursing scheme, eliminating the grinding transition and increasing productivity while ensuring a given machining accuracy.

Keywords: accuracy and quality of processing, processing productivity, main processing time, nursing, initial tightness, grinding wheel.

1. Введение. Параметры точности и качества обработки при шлифовании во многом зависят от упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Это связано в первую очередь с высокой силовой напряженностью процесса шлифования, обусловленной интенсивным трением

связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. В результате энергоемкость обработки при шлифовании больше, чем при лезвийной обработке, что является причиной возникновения температурных дефектов на обрабатываемой поверхности, т.е. ухудшения качества обработки, а

также снижения точности обработки. Как показывает практика, уменьшить упругие перемещения при шлифовании можно увеличением жесткости технологической системы станка и снижением энергоемкости обработки за счет повышения режущей способности шлифовального круга. Важным направлением также следует рассматривать управление упругими перемещениями путем создания начального натяга в технологической системе. В связи с этим в работе решается актуальная задача определения закономерностей формирования упругих перемещений в технологической системе при шлифовании и условий их уменьшения за счет создания начального натяга.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

В работах [1-3] определены основные направления повышения точности обработки при шлифовании за счет управления упругими перемещениями в технологической системе. В работе [4] приведено аналитическое решение об условиях возникновения упругих перемещений при шлифовании, полученное с применением экспериментальных данных силы резания, что не позволило в обобщенном виде установить оптимальные параметры шлифования по критерию точности обработки. Поэтому поставлена задача: получить теоретическое решение определения упругих перемещений при шлифовании с учетом аналитического представления силы резания. Такой подход позволит по-новому подойти к определению основного времени обработки, оптимальных параметров шлифования по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности обработки.

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование основных направлений уменьшения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании, и повышение точности, качества и производительности обработки.

4. Изложение основного материала. Предположим, под действием радиальной составляющей силы резания P_y в технологической системе возникают упругие перемещения y . Уравнение баланса перемещений y в процессе шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с номинальной скоростью $V'_{дет}$ (рис. 1), имеет вид

$$y = V'_{дет} \cdot \tau - \int \bar{V}'_{дет} \cdot d\tau, \quad (1)$$

где τ – время обработки, с; $\bar{V}'_{дет}$ – фактическая скорость движения образца, м/с ($\bar{V}'_{дет} \leq V'_{дет}$).

При работе круга в режиме самозатачивания процесс шлифования стабилизируется во времени и величина y принимает постоянное значение. Фактический съем материала, определяемый вторым слагаемым в зависимости (1), меньше номинального съема материала, устанавливаемого по лимбу станка и определяемого первым слагаемым.

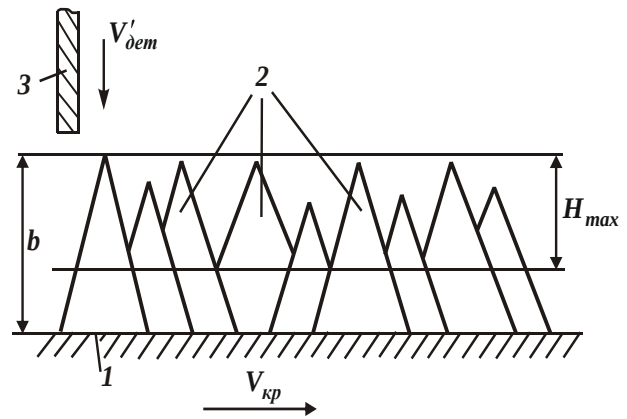


Рис. 1 – Расчетные схемы шлифования: 1 – связка круга; 2 – режущие зерна; 3 – обрабатываемый образец; 4 – изношенная часть зерна ($V_{кр}$ – скорость круга, м/с; b – максимальная высота выступания режущих зерен на уровне связки шлифовального круга, м; H_{max} – максимальная толщина среза зернами круга, м)

При работе круга в режиме затупления величина y переменна во времени (непрерывно увеличивается). Это обусловлено более интенсивным увеличением первого слагаемого.

Установим из уравнения (1) скорость $\bar{V}'_{дет}$ как функцию от времени шлифования с учетом $P_y = c \cdot y$, где c – жесткость технологической системы, Н/м.

Радиальная составляющая силы резания P_y определяется из зависимости:

$$P_y = \frac{P_z}{K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{K_{ш}}, \quad (2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; $S_{мгн}$ – суммарная площадь среза всеми одновременно работающими зернами круга, м².

В работе [5] приведены аналитические зависимости для определения параметров шлифования:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \cdot \tan \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{1 - \eta}}; \quad (3)$$

$$K_{ш} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot \tan \gamma \cdot HV}}; \quad (4)$$

$$S_{мгн} = \frac{F \cdot \bar{V}'_{дет}}{V_{кр}}, \quad (5)$$

где HV , $\sigma_{сж}$ – соответственно твердость по Виккерсу и предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; 2γ – угол при вершине режущего конусообразного зерна; η – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления режущего зерна, 0...1,0 ($\eta \rightarrow 0$ – для

острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного зерна); F – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемым образцом, м^2 ; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с .

Подставляя зависимости (3) – (5) в (2), имеем:

$$P_y = \frac{\pi \cdot tg\gamma \cdot HV \cdot F \cdot \bar{V}'_{dem}}{2 \cdot (1-\eta) \cdot V_{кр}}. \quad (6)$$

После подстановки зависимости (6) в интегральное уравнение (1) и его дифференцирования по времени τ , получено дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\bar{V}'_{dem}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3} \cdot (V'_{dem} - \bar{V}'_{dem}), \quad (7)$$

$$\text{где } \alpha_3 = \frac{\pi \cdot tg\gamma \cdot HV \cdot F}{2 \cdot c \cdot (1-\eta) \cdot V_{кр}}.$$

Решая дифференциальное уравнение (7) методом разделения переменных и принимая в первом приближении $(1-\eta)$ постоянной величиной, т.е. не учитывая износ зерен круга во времени, получено:

$$\frac{d\bar{V}'_{dem}}{(V'_{dem} - \bar{V}'_{dem})} = \frac{d\tau}{\alpha_3}, \quad (8)$$

$$\text{откуда } \ln(V'_{dem} - \bar{V}'_{dem}) = -\frac{\tau}{\alpha_3} + C_0 \quad \text{или}$$

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} - C_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}. \quad (9)$$

Постоянная интегрирования C_1 определяется из начального условия обработки, например, из условия $\bar{V}'_{dem}(\tau = 0) = 0$. Тогда $C_1 = V'_{dem}$ и решение дифференциального уравнения (9) принимает вид:

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что с течением времени обработки τ фактическая скорость движения обрабатываемого образца (или фактическая скорость съема материала) $\bar{V}'_{dem}$ увеличивается, неограниченно приближаясь к номинальной скорости движения образца (или номинальной скорости съема материала) V'_{dem} (рис. 2). Подставляя зависимость (10) в уравнение (1), определено упругое перемещение y :

$$y = -V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} + C_2. \quad (11)$$

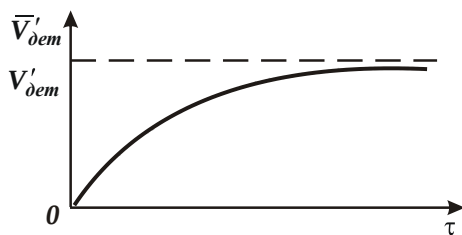


Рис. 2 – Зависимость $\bar{V}'_{dem}$ от τ

Постоянная интегрирования C_2 определяется из начального условия $y(\tau = 0) = 0$. Тогда $C_2 = V'_{dem} \cdot \alpha_3$ и зависимость (11) описывается:

$$y = V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (12)$$

Характер изменения величины y во времени такой же, как и параметра $\bar{V}'_{dem}$ (рис. 2). Согласно зависимости (6), произведение $V'_{dem} \cdot \alpha_3$ определяет значение $y = y_0$ при скорости V'_{dem} . Тогда зависимость (12) можно представить в виде:

$$y = y_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (13)$$

При условии $\tau \rightarrow \infty$ значение $y \rightarrow y_0$, т.е. увеличивается, что снижает точность обработки.

При условии создания начального натяга в технологической системе, т.е. при начальных условиях:

$$\begin{cases} \bar{V}'_{dem}(\tau = 0) = V_1; \\ y(\tau = 0) = y_1 \end{cases} \quad (14)$$

решение дифференциального уравнения (8) принимает вид:

$$\bar{V}'_{dem} = V'_{dem} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right) + V_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}, \quad (15)$$

$$y = y_1 - (V_1 - V'_{dem}) \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (16)$$

С учетом зависимости (6) и $y_1 = \alpha_3 \cdot V_1$, имеем:

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} + V'_{dem} \cdot \alpha_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}\right). \quad (17)$$

Первое слагаемое определяет упругое перемещение на переходе выхаживания, а второе слагаемое – на переходе чистового шлифования. Как видно, слагаемые, входящие в зависимость (17), оказывают противоположное влияние на характер изменения величины упругого перемещения y во времени. Уменьшить величину y и тем самым повысить точность обработки можно исключением второго слагаемого из зависимости (17). Это выполняется при $V'_{dem} = 0$, т.е. при шлифовании без подачи с начальным радиальным перемещением y_1 . В этом случае основное время обработки определяется лишь временем перехода выхаживания.

На практике данная схема обработки применяется при съеме относительно небольших припусков на доводочных операциях. В

действительности, возможности этой схемы значительно шире и она может быть использована при съеме больших припусков, оставляемых при предварительной лезвийной и окончательной абразивной обработке [6].

Эффект схемы состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки. Основными ограничениями применения схемы являются обеспечение высокой режущей способности шлифовального круга и создание начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска, который может достигать больших значений – 1...2 мм и более. В этих условиях на практике принято основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента и лишь небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме (с начальным радиальным перемещением y_1). При обеспечении высокой режущей способности шлифовального круга можно удалять значительные припуски по данной схеме выхаживания, исключая переход шлифования и увеличивая производительность при обеспечении заданной точности обработки.

Обработка по жесткой схеме описывается вторым слагаемым в зависимости (17). Ее применение ведет к увеличению величины y (снижению точности обработки). Следовательно, применяемые на практике схемы обработки лезвийными и абразивными инструментами с точки зрения обеспечения точности обработки являются малопродуктивными. Необходимо использовать схему обработки без подачи с начальным радиальным перемещением, уменьшая припуски под обработку и ограничиваясь финишными операциями с применением абразивных и лезвийных инструментов.

По сути, применяемые на практике процессы резания по жесткой схеме являются вынужденной мерой в связи с необходимостью съема относительно больших припусков и сложностью обеспечения высокой режущей способности инструмента.

При абразивной обработке без подачи с начальным радиальным перемещением (т.е. при выхаживании) выполняется условие $V'_{det}=0$. В результате зависимости (15) и (17) принимают вид:

$$\bar{V}'_{det} = V_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}} = \frac{y_1}{\alpha_3} \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}, \quad (18)$$

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{\alpha_3}}. \quad (19)$$

Фактическая скорость съема материала V'_{det} и упругое перемещение y с течением времени обработки τ непрерывно уменьшаются. Начальные значения $\bar{V}'_{det}$ и y определяются значением радиального перемещения y_1 . Чем больше y_1 , тем больше параметры $\bar{V}'_{det}$ и y . Интенсивность уменьшения параметров $\bar{V}'_{det}$ и y с течением

времени зависит от параметра α_3 .

Полученные решения справедливы при условии постоянства во времени безразмерного коэффициента η , определяющего степень затупления режущих зерен. В действительности, с течением времени обработки коэффициент η увеличивается в связи с износом зерен. Это приводит к более сложному решению дифференциального уравнения (8). Однако в первом приближении можно принять решение в виде зависимости (10), согласно которой с увеличением коэффициента η фактическая скорость движения обрабатываемого образца $\bar{V}'_{det}$ с течением времени будет увеличиваться менее интенсивно. Это снизит эффективность применения схемы выхаживания с начальным натягом в технологической системе.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании. Это позволило определить основное время обработки на переходах шлифования и выхаживания. Показано, что наименьшее основное время обработки при заданной точности обработки достигается при условии полного съема припуска лишь по схеме выхаживания, создавая начальный натяг в технологической системе. Установлено, что в этом случае наибольшее влияние на основное время обработки оказывает степень затупления режущих зерен круга. С увеличением режущей способности круга основное время обработки уменьшается, появляется возможность увеличения начального натяга в технологической системе с одновременным обеспечением увеличения производительности обработки при достижении заданной точности.

Список литературы:

1. Лурье Г. Б. *Шлифование металлов* / Г. Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
2. Колев К. С. *Точность обработки и режимы резания* / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Новоселов Ю. К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке* / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Тверской М. М. *Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках* / М. М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
5. *Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие* / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
6. Полянский В. И. *Теоретическое обоснование условий высокопроизводительной и высокопроизводительной механической обработки деталей машин* / В. И. Полянский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 11 (1336), 2019. – С. 65–69.

References (transliterated)

1. Lur'ye G. B. *Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya* [Progressive methods of circular external grinding]. Leningrad, Mashinostroyeniye. 103 s. (1984).
2. Kolev K. S., Gorchakov L. M. *Tochnost' obrabotki i rezhimy rezaniya* [Precision of processing and cutting conditions]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 144 s. (1976).

3. Novoselov YU. K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of surface formation during abrasive processing]. – Saratov. 232 s. (1979).
4. Tverskoy M. M. *Avtomaticheskoye upravleniye rezhimami obrabotki detaley na stankakh* [Automatic control of the modes of processing parts on machines]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 208 c. (1982).
5. Yakimov A. V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S., Yakimov A. A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov* [Theoretical foundations of cutting and grinding of materials]: ucheb. posobiye. – Odessa, OGPU. 450 s. (1999).
6. Polyanskiy V. I. *Teoreticheskoye obosnovaniye usloviy vysokotochnoy i vysokoproizvoditel'noy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin* [Theoretical substantiation of the conditions of high-precision and high-performance machining of machine parts] // *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: *Innovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy]: zb. nauk. pr. / Natsional'nyy tekhnichnyy universytet «Kharkiv politekhn. in-t». Kharkiv, NTU «KHPI». 11 (1336). 65–69 (2019).

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych) – доктор технічних наук, професор кафедри "Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356

ПЕРМЯКОВ А.А., ЮЧРШИН О.Я., ПЕРМИНОВ Е.В., ШЕПЕЛЕВ Д.К.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ РЕЕК

Изучены инновационные технологические направления для обеспечения стабилизации процесса обработки зубчатых реек с учетом специфических условий формообразования, структуры технологического процесса обработки, формы рейки, влияющей на выбор технологического оборудования и выбор технологических баз, степени точности, параметров шероховатости рабочих поверхностей зубьев. Предложено оригинальное решение выбора технологического способа подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек с учетом формирования оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин зубообрабатывающего инструмента, шероховатости, микротвердости и остаточных напряжений режущей части зубообрабатывающего инструмента), характерных для данных условий обработки (обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы). Приведены экспериментальные зависимости, позволяющие рассчитывать насыщение зубообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте.

Ключевые слова: инновационные технологические процессы, стабилизация, зубчатые рейки, параметры шероховатости, зубообрабатывающий инструмент, радиус округления режущей кромки, насыщение инструмента дисульфидом молибдена, термодиффузионный способ.

**ПЕРМЯКОВ А.А., ЮЧРШИН О.Я., ПЕРМИНОВ Е.В., ШЕПЕЛЕВ Д.К.,
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЗУБЧАТИХ РЕЙОК**

Вивчено інноваційні технологічні напрямки для забезпечення стабілізації процесу обробки зубчастих рейок з урахуванням специфічних умов формоутворення, структури технологічного процесу обробки, форми рейки, що впливає на вибір технологічного обладнання та вибір технологічних баз, ступеня точності, параметрів шорсткості робочих поверхонь зубів. Запропоновано оригінальне рішення вибору технологічного способу підготовки зубообробного інструменту при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення для досягнення параметрів точності обробки рейок з урахуванням формування оптимальної геометрії, і стану поверхневого шару ріжучої частини зубообробного інструменту (радіус округлення різальної кромки і вершин зубообробного інструменту, шорсткості, микротвердості і залишкових напруж ріжучої частини зубообробного інструменту), характерних для даних умов обробки (опрацьований матеріал, матеріал ріжучої частини інструменту, режими різання, стабілізація сил різання, МОР, жорсткість технологічної системи). Наведено експериментальні залежності, які дозволяють розраховувати насичення зубообробного інструменту зі швидкорізальної сталі дисульфідом молибдену термодифузійним способом з подальшою обробкою в рідкому азоті.

Ключові слова: інноваційні технологічні процеси, стабілізація, зубчасті рейки, параметри шорсткості, зубообробний інструмент, радіус округлення різальної кромки, насичення інструменту дисульфідом молибдену, термодифузійний спосіб.

**PERMYAKOV A.A., YUCHRSHIN O.Y., PERMINOV E.V., SHEPELEV D.K.
INNOVATIVE TECHNOLOGICAL DIRECTIONS FOR ENSURING STABILIZATION OF THE PROCESS OF PROCESSING OF GEARS**

Innovative technological areas to ensure stabilization of the gear rack processing process taking into account the specific conditions of shaping, the structure of the technological process of processing, the shape of the rack, which affects the choice of technological equipment and the choice of technological bases, the degree of accuracy, and the roughness parameters of the working surfaces of the teeth were studied. An original solution is proposed for choosing a technological method for preparing a gear cutting tool while ensuring stabilization of the shaping process to achieve accuracy parameters for processing the slats taking into account the formation of the optimal geometry, and the state of the surface layer of the cutting part of the gear cutting tool (radius of rounding of the cutting edge and vertices of the gear processing tool, roughness, microhardness and residual stresses cutting part of the gear) data processing conditions (the processed material, the material of the cutting part of the tool, cutting conditions, stabilization of cutting forces, coolant, rigidity of the technological system). Experimental dependences that allow calculating the saturation of a tooth-processing tool made of high-speed steel with a molybdenum disulfide by the thermal diffusion method followed by treatment in liquid nitrogen were presented.

Key words: innovative technological processes, stabilization, gear racks, gear parameters, gear tool, circular rounded cutting edge, instrument equipped with molybdenum, thermal diffusion.

1.Введение. Структура технологического определяют основные требования к структуре
проце
сса
обраб
отки зубчатых реек зависит от формы рейки,
влияющей на выбор технологического оборудования
и выбор технологических баз, степени точности,
параметров шероховатости рабочих поверхностей
зубьев.

Нормы точности зубчатых реек: кинематической
точности, плавности работы, контакта зубьев
регламентируются предельными отклонениями и
допусками в зависимости от геометрических
параметров и функциональных зависимостей и

технологического процесса

2.Основная часть. В соответствии с
проведенными исследованиями по изучению
параметров зубонарезания реек и их влиянию на
стабилизацию процесса формообразования (Рис. 1)
рассмотрены зависимости изменения оптимального
угла рассогласования фаз от обрабатываемого
модуля зубчатой рейки при различных

© А.А. Пермяков, О.Я. Ючршин, С.П.Сапон, Д.К.Шепелев, 2020

технологических режимах обработки.

Установлено, что при увеличении подачи оптимальный угол увеличивается, при уменьшении подачи – уменьшается [1, 4, 5, 6, 11]. Данные

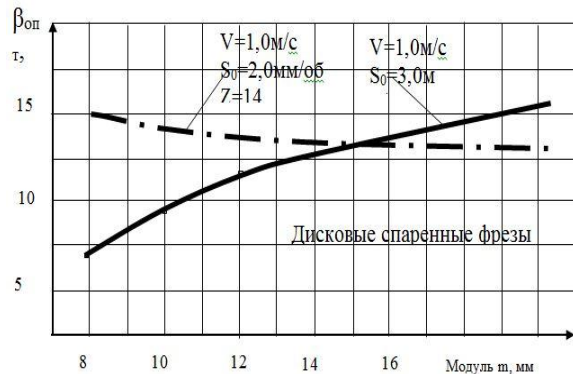


Рис.1 – Зависимость изменения оптимального угла рассогласования β_{opt} от обрабатываемого модуля зубчатой рейки при различных технологических режимах обработки

Изменение наибольшего угла контакта зуба фрезы с обрабатываемой рейкой представлено на рис. 2.

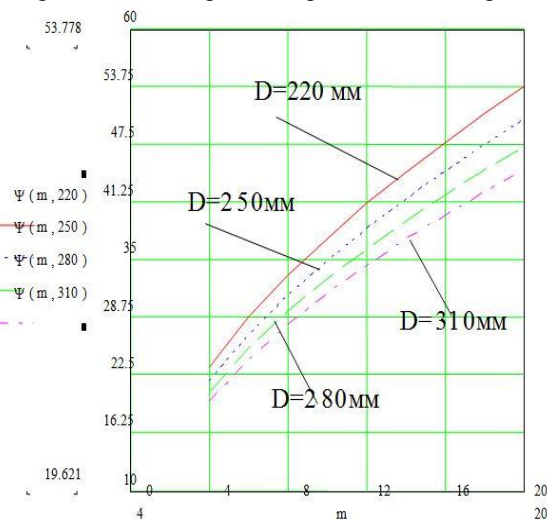


Рис. 2 – Изменение угла контакта зуба фрезы с обрабатываемой рейкой

В процессе формообразования при рассмотрении фрезерования как дискретного перемещения зуба фрезы, каждая точка активной части режущего лезвия имеет свою траекторию и этим самым определяет способность поверхностных слоев инструмента сопротивляться разрушению при сходе стружки по передней поверхности и трению скольжения по задним поверхностям, а также при микроперемещениях, обусловленных воздействием вибраций в процессе обработки [2, 7, 10].

Геометрия зуборезного инструмента имеет форму, которая рассчитывается только в зависимости от схемы зубонарезания без учета износа инструмента при эксплуатации. Поэтому технологическая подготовка инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования играет существенную для достижения параметров зубонарезания реек.

зависимости позволяют прогнозировать разработку технологической оснастки для установки и закрепления комплектов дисковых зуборезных фрез.

Наличие износа режущего инструмента приводит к снижению точности обработки зубчатых реек, увеличению динамических нагрузок и росту сил резания, что ведет к снижению стойкости зубообрабатывающего инструмента, появлению преждевременных отказов [2, 7, 9]. В условиях современного уровня технологии машиностроения необходимо управлять с большой вероятностью процессами формообразования, а значит, и обеспечить заданный износ инструмента, исходя из условий точности обработки реек (Рис. 3).

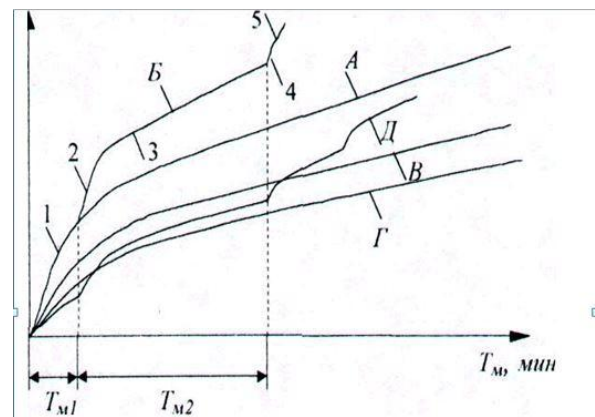


Рис. 3 – Кривые износа режущей части зуборезных дисковых фрез по задней поверхности при встречном фрезеровании:

А - для не изменяющихся условий резания;
Б – для обычных фрез при изменяющихся условиях резания;
В - для не изменяющихся условий резания при оптимальной геометрии фрез;
Г - для постоянных условий работы фрез при оптимальной геометрии с нанесенным износостойким покрытием;
Д - для быстро прирабатывающихся фрез при изменяющихся условиях.

Рассмотрим технологические способы подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек (Рис. 4).

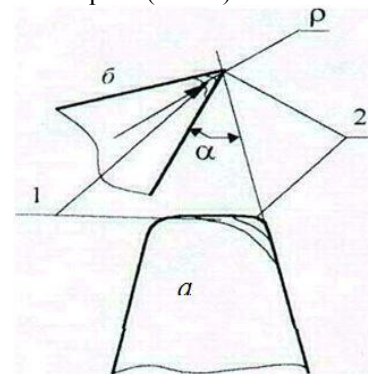


Рис. 4 – Износ вершин профильной части дисковых зуборезных фрез;

а - формирование радиуса при вершине;
б - формирование радиуса округления режущей кромки;
1 - период приработки;

2 - период нормального износа;
 ρ - радиус округления режущего лезвия инструмента;
 α - задний угол фрезы.

Физическая картина износа зубообрабатывающего инструмента. Износ зубообрабатывающего инструмента описывают зависимостью величины износа от машинного времени (кривая А на рис 4), которая получается при постоянных, не изменяющихся условиях резания. Первоначальный интенсивный износ, соответствующий периоду приработки, объясняется формированием оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин зубообрабатывающего инструмента, шероховатости, микротвердости и остаточных напряжений режущей части зубообрабатывающего инструмента), характерных для данных условий обработки (обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы). В этот период происходит интенсивный молекулярный износ, и разрушение выступов шероховатости рабочей части зубообрабатывающего инструмента на участках наибольших давлений. Это приводит к изменению геометрии и микрогеометрии режущего участка зубообрабатывающего инструмента, что способствует постепенному выравниванию рабочих давлений в зоне резания и равномерности износа различных участков режущего клина (рис 4).

Состояние поверхностного слоя рабочих участков вершин, режущих кромок, задних и передней поверхности зубообрабатывающего инструмента также претерпевают изменение, приобретая постепенно так называемое «равновесное состояние» [3, 10] Все это приводит к постепенному переходу к нормальному износу зубообрабатывающего инструмента, которому соответствует сформировавшаяся оптимальная геометрия и состояние поверхностного слоя режущей части инструмента для данных условий обработки. Причем этот переход бывает плавным и зачастую трудно строго разграничить участок приработки и нормального износа. Постепенное накопление усталости в поверхностном слое материала режущей части зубообрабатывающего инструмента приводит к его разрушению, т.е. к началу катастрофического износа.

Однако, эта физическая картина периодичности износа свойственна для зубообрабатывающего инструмента, работающего при постоянных не изменяющихся условиях обработки (серийное, крупносерийное производство зубчатых реечных передач). При мелкосерийном и индивидуальном производстве инструмент, как правило, работает при изменяющихся условиях обработки (обрабатываемый материал, режимы резания). Это приводит к тому, что их рабочая часть должна постоянно приспосабливаться к новым условиям обработки. Размерный износ зубообрабатывающего инструмента

для данного случая можно описать кривой - Б (рис. 3). Причем в зависимости от количества деталей в партии износ зубообрабатывающего инструмента может и не выйти из периода приработки (рис. 3, участок 1, кривой Б), так как изменившиеся условия обработки приведут к новому периоду приработки (рис. 2.10, участок 2, кривой Б).

Математическое описание интенсивности износа зубообрабатывающего инструмента рассчитывается по формуле [2, 10]

$$I_h = \frac{\chi}{n \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}} \cdot \frac{A_r}{A}, \quad (1)$$

где n - число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала. Поверхностные остаточные напряжения приводят к соответствующему изменению данного числа циклов. Это изменение учитывается с помощью коэффициента, определяемого из равенства [2, 8].

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_b - \sigma_t}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (2)$$

где σ_b - временное сопротивление разрыву; σ_t - предел текучести; σ_a - действующая величина амплитудного напряжения в рабочем слое; t_y - параметр фрикционной усталости материала режущей части зубообрабатывающего инструмента при упругом контакте; χ - параметр, рассчитываемый по формуле:

$$\chi = \frac{1}{2 \cdot (v + 1)} \cdot \sqrt{\frac{v}{2 \cdot \alpha_k}}, \quad (3)$$

где α_k - коэффициент, учитывающий отличие площади сечения выступов на уровне ρ от величины фактической площади контакта на том же уровне. В соответствии с разработанной теорией контактного взаимодействия деталей машин $\alpha_k = 1$; v - параметр опорной кривой профиля шероховатости вершин зубообрабатывающего инструмента ($v = 2$ [2]).

Учитывая значительные контактные давления при фрезеровании, можно принимать, что фактическая площадь контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой равна номинальной площади, т.е. $A_r = A$, и следовательно $A_r/A = 1$. Из этих же соображений $h = R_z$ [2]. При фрезеровании, для расчета интенсивности износа, в качестве локального выступа шероховатости ρ можно принимать радиус округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента [2].

При достаточно большом машинном времени обработки новой партии деталей (T_{M2}), износ зубообрабатывающего инструмента перейдет к нормальному (рис. 3, участок 3, кривой Б) Однако изменение условий обработки (изготовление новой партии деталей) приведет к новому периоду приработки (рис. 3, участок 4, кривой Б) и т.д. Естественно, что изменяющиеся условия работы зубообрабатывающего инструмента приводят к

ускорению катастрофического износа (рис. 3, участок 5, кривой Б) и к снижению качества обрабатываемой поверхности.

Описанная физическая картина периодичности износа зубообрабатывающего инструмента и установленные причины, определяющие их износостойкость, позволяют наметить общие возможности повышения износостойкости зубообрабатывающего инструмента [2, 5, 7]. Для

зубообрабатывающих инструментов, работающих при определенных, неизменных условиях, на стадии их изготовления, необходимо обеспечить оптимальную геометрию и состояние поверхностного слоя его рабочей части. Так, оптимальные значения радиуса округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента из различных материалов в зависимости от обрабатываемого материала зубчатых изделий приведены в табл. 1.

Таблица – 1 Оптимальный радиус округления режущей кромки РИ ρ при обработке различных материалов зубчатых реек и колес

Обрабатываемый материал	Материал режущего лезвия зубообрабатывающего	Оптимальный радиус округления, ρ , мкм
Сталь 45	P6M5	10
Сталь 40X	P6M5	8
Сталь АЦ40Х	P6M5	10
Счаль 4 5	BK8	55
Сталь 40X	BK8M	50
Сталь АЦ40Х	BK8	55
Чугун СЧ18	BK8	60

Обеспечение оптимального значения этого радиуса осуществляется технологией заточки зубообрабатывающего инструмента и доводки режущей кромки. Оптимальное состояние поверхностного слоя рабочих участков зубообрабатывающего инструмента определяется их материалом и достигается технологией заточки и термообработки. Комплексно обеспечить оптимальную геометрию и состояние поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента, как показала практика, позволяет для сборных дисковых фрез, оснащенных неперетачиваемыми твердосплавными пластинками, виброабразивная обработка, для фрез быстрорежущих - доводка алмазными кругами. Если все эти мероприятия не дают должного эффекта, то прибегают к нанесению различных износостойких покрытий для твердосплавных пластинок и для инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей, путем насыщения дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте [73].

В настоящее время среди многих способов термодиффузионных покрытий в области повышения износостойкости металлорежущего инструмента наибольшее распространение получили способы термодиффузионного хромирования, хромирования и последовательного насыщения инструментальных сталей хромом и бором. После хромирования и борирования инструмента необходима механическая обработка, что приводит к дополнительным затратам [2, 8, 11].

С целью повышения стойкости инструмента после диффузионного насыщения перед обработкой

инструмента производить его нагрев с выдержкой при температуре 240...260°C в термопечи, а после обработки производить выдержку в щелочной ванне при температуре 165...1700С.

Последовательность насыщения инструмента дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в среде жидкого азота показана на рис. 5.

При нагреве инструмента из быстрорежущей стали в слабо окислительной среде образуется поверхностный слой, прочно связанный с металлом, который заменяет процесс напыления дисульфидом молибдена механическим натиранием. В этом случае прочный поверхностный слой, обладающий повышенной адгезией осажденного слоя с металлом образуется за счет полного разложения глицерина и взаимодействия продуктов его разложения с дисульфидом молибдена.

При выборе температуры нагрева учитывались свойства глицерина. Как известно, температура разложения глицерина 260°C. При его разложении образуются различные виды производных: глицериновый альдегид и диоксиацетон, что в данных условиях термообработки способствует появлению смолистых веществ, которые в процессе спекания и коксования образуют прочно связанные с металлом защитные пленки. Защитные пленки с дисульфидом молибдена увеличивают стойкость зубообрабатывающего инструмента.

Последующая обработка изделий в щелочной ванне позволяет удалить нестойкие частицы поверхностного слоя, размягчить его, что устраняет разрушение поверхностной пленки при обработке в среде жидкого азота и образует твердую

оболочку, повышающую прочность сцепления покрытая с поверхностью инструмента при возникновении сверхвысоких давлений в среде жидкого азота.

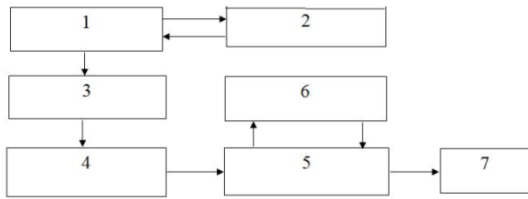


Рис. 5 – Схема насыщения зубообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте:

1 - обезжиривание инструмента, промывка в холодной ($T=20^{\circ}\text{C}$) и горячей воде ($T=40...60^{\circ}\text{C}$), сушка в потоке нагретого воздуха в специальных шкафах; 2 – травление инструмента с целью удаления дефектных покрытий; 3 - диффузионное насыщение в глицерине при $T=180...200^{\circ}\text{C}$ добавляется 50...60 г дисульфида молибдена на- 1000 г глицерина, выдержав в растворе 2 ч при $T=200 \pm 10^{\circ}\text{C}$; 4 - термическая обработка в печи при $T=240...260^{\circ}\text{C}$; 5 - щелочная обработка с последующей промывкой в холодной и горячей воде; 6 - обработка в среде жидкого азота; 7 – консервация

Были опробованы различные составы и режимы работы щелочной ванны. Наибольшая интенсивность обработки была получена в щелочной ванне, раствор которой содержит: едкий натр в количестве 1300 г/л, азотнокислый натрий в количестве 100 г/л. Температура обработки $165...170^{\circ}\text{C}$.

Время выдержки инструмента t в щелочной ванне зависит от массы M одновременной загрузки зубообрабатывающего инструмента $t = M \cdot K$, мин, где K - коэффициент сложности профиля инструмента; например, для дисковой зуборезной фрезы $K=1$, червячной модульной фрезы $K=2,2$, масса загрузки в кг.

Процесс обработки инструмента в щелочной ванне включает две фазы: доведение температуры щелочной ванны до заданной без инструмента и доведение температуры ванны после загрузки инструмента до заданной (раствор закипает снова) и щелочная обработка инструмента.

Повторная обработка инструмента В щелочном растворе после обработки в среде жидкого азота стабилизирует поверхностные напряжения в защитном слое, что обеспечивает высокое качество обработки поверхностного слоя зубчатых реек.

Предварительное материаловедческое и технологическое обеспечение оптимальной геометрии и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента позволяет практически избежать периода приработки - кривая В (рис. 3), а, следовательно, в значительной мере, повысить их стойкость. Нанесение износостойких покрытий из нитрида титана и насыщение рабочих поверхностей зубообрабатывающего инструмента дисульфидом молибдена, также способствует уменьшению интенсивности износа в установившейся

период их работы. Совместное, комплексное проведение этих мероприятий позволяет достичь суммарного эффекта в повышении износостойкости зубообрабатывающего инструмента - кривая Г (рис. 3).

Вышеизложенные мероприятия, хорошо показавшие себя на зубообрабатывающем инструменте, работающих при неизменных условиях обработки, не могут быть достаточно эффективными при изменяющихся условиях обработки, когда, как показывает практика, они постоянно работают в периоде приработки. Для повышения износостойкости таких зубообрабатывающих инструментов применяют быструю прирабатываемость, т.е. значительно сокращают периоды приработки. Износ этих зубообрабатывающих инструментов можно представить в виде кривой - Д (рис. 3). Технологически это можно обеспечить за счет нанесения многослойных покрытий на режущей части зубообрабатывающих инструментов, виброабразивной обработки с последующим нанесением износостойких покрытий со среднестатической оптимальной геометрией. Так многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что среднестатическим оптимальным радиусом округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента оснащенного твердосплавными пластинками при чистовом фрезеровании зубьев будет $r=50$ мкм, для быстрорежущих дисковых зуборезных фрез $r=10$ мкм, которые технологически обеспечиваются при определенных режимах виброабразивной обработки и алмазной доводкой на заточных станках. Особенно эффективной, в этих случаях, может быть, так называемая "ионная имплантация", позволяющая создавать послойно изменяющийся состав материала.

На качество обработанной поверхности влияет направление неровностей при заточке передней поверхности зубообрабатывающих инструментов [2, 5, 11] во взаимосвязи с процессом наростообразования при создании технологических условий схода наростообразования в период приработки инструмента [8, 11].

Выводы. Разработаны инновационные технологические для обеспечения стабилизации процесса обработки зубчатых реек с учетом специфических условий формообразования, структуры технологического процесса обработки, формы рейки, влияющей на выбор технологического оборудования и выбор технологических баз, степени точности, параметров шероховатости рабочих поверхностей зубьев.

Предложена оригинальное решение выбора технологического способа подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек с учетом формирования оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин

зубообробляючого інструмента, шероховатості, мікротвердості і остаточних напружень режущої частини зубообробляючого інструмента).

Рассмотрены характерных для данных условий обработки обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы.

Приведены экспериментальные зависимости, позволяющие рассчитывать насыщение зубообробляющего инструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте.

Список литературы:

1. Ключко О.О., Юрчишин О.Я., Охріменко О.А., Семінська Н.В. Функціональний зв'язок умов обробки з параметрами стану поверхні зубів рейок. ISSN 2521-1943. MECHANICS AND ADVANCED TECHNOLOGIES #3 (87), 2019 – С.91 – 99.
2. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек / А. А. Ключко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Ключко, Е. В. Мironenko // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). – С. 138–145..
3. Мironenko E. V. Взаимосвязь мощности и крутящего момента при формообразовании зубьев колес и реек / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2007. – Вип. 22. – С. 30–34.
4. Shah, C., Thigale, S., & Shah, R. (2018). Optimizing weight of a Gear using Topology Optimization. International Journal of Science, Engineering and Technology Research 7(6), 403- 406.
5. Gavranovic, S., Hartmann, D., & Wever. (2015). U.Topology Optimization using GPGPU. EUROGEN 2015. September 14-16, Glasgow, UK.
6. Mohammadkhani, R., Nemati, D., & Babaei B. (2012). Optimizing Helical Gear Profile for Decreasing Gearbox Noise. Journal of Basic and Applied Research International 2, 6685-6693.
7. Мironenko E. B. Технология предварительной обработки закаленных зубчатых колес и реек дисковыми сборными фрезами с раздельной схемой резания / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко, В. С. Лебединский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – Вип. 28. – С. 219–225
8. Мironenko E. B. Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск : К. : ДГМА, 2008. – Вип. 23. – С. 69–73.
9. Czerniec, M., Kielbiński, J., & Czerniec, J. (2019). Computer Simulation of the Impact of Optimization of Width in the Helical Cylindrical Gear on Bearing and Durability. Part 1. Height Correction of the Gear Profile. Advances in Science and Technology. Research Journal, 13(1), 52–59.

10. Jian, K., Li-Ping, Z., & Wen-Qiang, Y. (2013). Optimization Design of a Gear Profile Based on Governing Equations. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(19), 4780-4784.

11. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667

References (transliterated)

1. Klochko O.O., Yurchishin O.Ya., Okhri`menko O.A., Semi`ns`ka N.V. Funkcz`ional`nij zv'yazok umov obrobki z parametrami stanu poverkhni` zub`iv rejok. ISSN 2521-1943. MECHANICS AND ADVANCED TECHNOLOGIES #3 (87), 2019 – S.91 – 99.
2. Novy`e tekhnologicheskie napravleniya chistovoj obrabotki zubchaty`kh reek / A. A. Klochko, N. I. Zinov`ev, Yu. A. Klochko, E. V. Mironenko // Visoki` tekhnologi`yi v mashinobuduvanni` :zb. nauk. pr. KhDPU. – Kharki`v, 2000. – Vip. 1(3). –S. 138–145..
3. Mironenko E. V. Vzaimosvyaz` moshnosti i krutyashhego momenta pri formoobrazovanii zub`ev koles i reek / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2007. – Vy`p. 22. – S. 30–34.
4. Shah, C., Thigale, S., & Shah, R. (2018). Optimizing weight of a Gear using Topology Optimization. International Journal of Science, Engineering and Technology Research 7(6), 403- 406.
5. Gavranovic, S., Hartmann, D., & Wever. (2015). U.Topology Optimization using GPGPU. EUROGEN 2015. September 14-16, Glasgow, UK.
6. Mohammadkhani, R., Nemati, D., & Babaei B. (2012). Optimizing Helical Gear Profile for Decreasing Gearbox Noise. Journal of Basic and Applied Research International 2, 6685-6693.
7. Mironenko E. V. Tekhnologiya predvaritel`noj obrabotki zakalenny`kh zubchaty`kh koles i reek diskovimi sborny`mi frezami s razdel`noj skhemoj rezaniya / E. V. Mironenko, A. A. Klochko, V. S. Lebedinskij // Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2011. – Vy`p. 28. – S. 219–225
8. Mironenko E. V. Topografiya iznosa zubonareznogo instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy`p. 23. – S. 69–73.
9. J. Czerniec, M., Kielbiński, J., & Czerniec, J. (2019). Computer Simulation of the Impact of Optimization of Width in the Helical Cylindrical Gear on Bearing and Durability. Part 1. Height Correction of the Gear Profile. Advances in Science and Technology. Research Journal, 13(1), 52–59.
10. Jian, K., Li-Ping, Z., & Wen-Qiang, Y. (2013). Optimization Design of a Gear Profile Based on Governing Equations. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(19), 4780-4784.
11. Tekhnologicheskie osnovy` zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles: monografiya / A. A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович (Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Alexander Anatolyevich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Юрчишин Оксана Ярославівна (Юрчишин Оксана Ярославовна, Yurchyshyn Oksana) – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, просп. Перемоги, 37, тел 097-796-45-23, e mail: yurchyshynoks@ukr.net.

Перминов Євген Віталійович (Перминов Евгений Витальевич, Perminov Evgeny Vitalievich) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (099) 510-31-62, e mail: gekauta@gmail.com.

Шепелев Дмитро Костянтинович (Шепелев Дмитрий Константинович, Shepelev Dmitry Konstantinovich)
– аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, , ORCID 0000-0001-9494-7892

СЕРГЕЕВ А. С.**УСЛОВИЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ**

Проведен теоретический анализ возможности уменьшения температуры резания при внутреннем шлифовании. Установлено, что увеличение длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью является важным фактором уменьшения температуры резания и, соответственно, повышения качества и производительности обработки. Эффект достигается в результате увеличения скорости детали. При этом глубина шлифования может оставаться постоянной, тогда как в традиционных схемах многопроходного шлифования увеличение скорости детали связано с уменьшением глубины шлифования при заданной производительности обработки. Этим показано, что за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью можно одновременно достигать уменьшения температуры резания и увеличения производительности обработки. Практической реализацией полученного решения является предложенный метод внутреннего шлифования, в котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Для снижения интенсивности трения в зоне шлифования предложено обработку производить кругами с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг одновременно позволяет уменьшить шероховатость поверхности и температуру резания, что имеет большое теоретическое и практическое значение при финишной обработке отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах. Проведенные исследования показали, что применение предложенного метода внутреннего шлифования позволяет повысить качество и производительность за счет снижения теплонпряженности процесса резания. Установлено, что на обрабатываемых поверхностях отсутствуют температурные дефекты.

Ключевые слова: качество и производительность обработки, обрабатываемое отверстие, мягкий войлочный круг, абразивный порошок, температурные дефекты, шероховатость поверхности.

СЕРГІЄВ О. С.**УМОВИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ВНУТРІШНЬОМУ ШЛІФУВАННІ**

Проведено теоретичний аналіз можливості зменшення температури різання при внутрішньому шліфуванні. Встановлено, що збільшення довжини дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю є важливим фактором зменшення температури різання й, відповідно, підвищення якості та продуктивності обробки. Ефект досягається в результаті збільшення швидкості деталі. При цьому глибина шліфування може залишатися незмінною, тоді як в традиційних схемах багатоходового шліфування збільшення швидкості деталі пов'язано зі зменшенням глибини шліфування при заданій продуктивності обробки. Цим показано, що за рахунок збільшення довжини дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю можна одночасно досягати зменшення температури різання і збільшення продуктивності обробки. Практичною реалізацією отриманого рішення є запропонований метод внутрішнього шліфування, в якому вісь обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору. Для зниження інтенсивності тертя в зоні шліфування запропоновано обробку здійснювати кругами з м'якою основою, наприклад, м'яким повстяним (фетровим) кругом з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Цей круг одночасно дозволяє зменшити шорсткість поверхні та температуру різання, що має велике теоретичне і практичне значення при фінішній обробці отворів в пневмо- і гідроциліндрах. Проведені дослідження показали, що застосування запропонованого методу внутрішнього шліфування дозволяє підвищити якість та продуктивність за рахунок зниження теплової напруженості процесу різання. Встановлено, що на оброблених поверхнях відсутні температурні дефекти.

Ключові слова: якість та продуктивність обробки, отвір, що обробляється, м'який повстяний круг, абразивний порошок, температурні дефекти, шорсткість поверхні.

SERHIEV ALEXANDER**CONDITIONS FOR REDUCING CUTTING TEMPERATURE DURING INTERNAL GRINDING**

A theoretical analysis of the possibility of reducing the cutting temperature during internal grinding. It has been established that increasing the length of the arc of contact between the grinding wheel and the workpiece is an important factor in reducing the cutting temperature and, accordingly, improving the quality and productivity of processing. The effect is achieved by increasing the speed of the part. At the same time, the grinding depth can remain constant, whereas in traditional multi-pass grinding schemes, an increase in the speed of a part is associated with a decrease in the grinding depth for a given processing productivity. This shows that by increasing the length of the arc of contact between the grinding wheel and the workpiece, it is possible to simultaneously achieve a decrease in cutting temperature and an increase in processing productivity. A practical implementation of the obtained solution is the proposed method of internal grinding, in which the axis of rotation of the grinding wheel with an individual drive is set perpendicular to the axis of rotation of the machined hole. To reduce the friction intensity in the grinding zone, it is proposed to carry out processing in circles with a soft base, for example, a soft felt (felt) circle with a glued layer of abrasive powder 63C 20P. This circle at the same time allows to reduce surface roughness and cutting temperature, which is of great theoretical and practical importance when finishing holes in pneumatic and hydraulic cylinders. Studies have shown that the application of the proposed method of internal grinding can improve the quality and productivity by reducing the heat stress of the cutting process. It has been established that there are no temperature defects on the treated surfaces.

Keywords: processing quality and performance, hole being machined, soft felt wheel, abrasive powder, temperature defects, surface roughness.

Введение. Создание современных машин и систем требует высококачественного изготовления деталей и их сборки. Важная роль в этом принадлежит процессам механической обработки деталей и в особенности процессам шлифования, где, как правило, окончательно формируются параметры качества обработки. Однако процессам шлифования присущи существенные недостатки, связанные с возможностью появления на обрабатываемых

поверхностях прижогов и других дефектов из-за высоких температур резания. Основной причиной возникновения увеличенных температур резания является небольшая площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Поэтому важным фактором ее увеличения следует рассматривать применение более эффективных кинематических схем шлифования, например, шлифования торцом круга, глубинного шлифования и

т.д., характеризующихся увеличенными длинами контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Однако эти схемы шлифования более применимы к условиям круглого наружного и плоского шлифования. При внутреннем шлифовании они или неприменимы, или малоэффективны. Поэтому актуальной задачей является разработка новых кинематических схем внутреннего шлифования, позволяющих уменьшить температуру резания и тем самым повысить качество и производительность обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

В работах [1-3] обоснована эффективность применения вместо схемы обычного шлифования периферией круга схемы шлифования торцом круга, позволяющей уменьшить температуру резания и повысить качество обработки за счет уменьшения плотности теплового потока. В работе [4] предложено использовать схему внутреннего шлифования, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 1 [5]). В этом случае существенно увеличивается длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой

деталью, что обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности. Особенно эффективно обработку по данной схеме осуществлять с применением кругов с мягкой основой, что позволяет дополнительно увеличить площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью и соответственно уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Экспериментально установлено, что в течение 30 минут шлифования по данной схеме на модернизированном токарном станке модели 1М63 (частота вращения шпинделя – 200 об./мин; частота вращения шлифовального круга – 1400 об./мин) достигается шероховатость поверхности $Ra = 0,04$.

Однако возможности практического применения данной схемы внутреннего шлифования могут быть значительно расширены благодаря возможности уменьшения еще и температуры резания за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью. В связи с этим важно провести теоретический анализ закономерностей формирования температуры резания и на этой основе определить рациональные условия шлифования по температурному критерию.

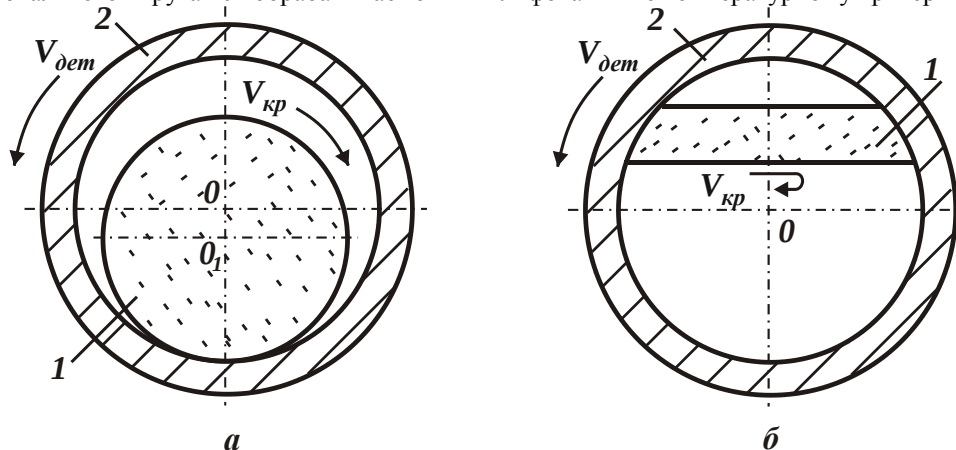


Рис. 1 – Схемы обычного внутреннего шлифования (а) и шлифования с перпендикулярным расположением осей вращения круга и детали (б): 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь

4. Цель исследования. Повышение качества обработки при внутреннем шлифовании за счет снижения температуры резания путем применения схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия.

5. Изложение основного материала. Для решения поставленных задач следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при шлифовании, полученной профессором Якимовым А. В. [1] и получившей широкое применение при анализе закономерностей управления тепловыми процессами при шлифовании:

$$\theta = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot V_{дет}}}, \quad (1)$$

где $q = P_z \cdot V_{кр} \cdot \bar{\psi} / F$ – плотность теплового потока, характеризующая количество теплоты, проходящей через единицу поверхности детали в единицу

времени, Вт/м²; $\bar{\psi}$ – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую обрабатываемой деталью (например, по данным работы [6] для алмазного шлифования необходимо принимать $\bar{\psi} = 0,4$, поскольку в теплоту переходит 80 % от всей работы, а обрабатываемой заготовкой поглощается 50 % теплоты); P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $F = B \cdot l$ – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м²; B – ширина шлифования, м; l – длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Зависимость (1) представлена в самом общем виде. Поэтому ее необходимо привести к конкретным условиям шлифования, выражая тангенциальную составляющую силы резания следующей зависимостью [6]: $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{мгн} = Q/V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими абразивными зернами шлифовального круга, м²; $Q = B \cdot t \cdot V_{дет}$ – производительность обработки, м³/с; t – глубина шлифования, м. Тогда $P_z = \sigma \cdot B \cdot t \cdot V_{дет}/V_{кр}$, а плотность теплового потока выразится: $q = \sigma \cdot V_{дет} \cdot t \cdot \bar{\psi} / l$. Соответственно температура резания θ определится:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot t \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot l}} = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot t}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B \cdot l}}. \quad (2)$$

При плоском шлифовании, представляя $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$ [4], зависимость (2) принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}, \quad (3)$$

где $R_{кр}$ – радиус круга, м.

Из зависимости (3) вытекает, что с уменьшением глубины шлифования t при обычном плоском шлифовании периферией круга и условии $Q = const$ (т.е. при пропорциональном увеличении скорости детали $V_{дет}$) температура резания θ уменьшается. Следовательно, для уменьшения температуры резания θ эффективно использовать схему многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали $V_{дет}$. Важным фактором уменьшения температуры резания θ необходимо также рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [5], снижающего интенсивность трения в зоне шлифования. Увеличение радиуса круга $R_{кр}$, исходя из зависимости (3), способствует снижению температуры резания θ , однако не существенно.

В зависимости (2) отношение $l/V_{дет}$ определяет время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью: с его увеличением температура резания θ уменьшается. Поэтому, очевидно, целесообразно шлифование производить с увеличенной длиной дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью l . Эффективным решением в этом направлении является применение схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [5]).



Рис. 2 – Схема внутреннего шлифования

По сравнению с традиционно применяемой схемой круглого внутреннего шлифования, длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью l в этом случае может быть увеличена в несколько раз. Следовательно, это создает условия уменьшения температуры резания θ и, соответственно, повышения качества и производительности обработки.

В зависимости (2) произведение $B \cdot l = F$. Поэтому, во сколько раз увеличится площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью F от применения указанной схемы внутреннего шлифования, во столько раз может быть увеличена производительность обработки Q при заданной температуре резания θ . Дополнительным фактором повышения производительности обработки Q или уменьшения температуры резания θ в этом случае необходимо рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, снижающих интенсивность трения в зоне шлифования.

Уменьшение глубины шлифования t также способствует увеличению производительности обработки Q или уменьшению температуры резания θ при условии $Q = const$. Причем, эффект от уменьшения глубины шлифования t будет более значительным, чем при использовании схемы шлифования периферией круга, поскольку параметр t входит в зависимость (2) с большей степенью, чем в зависимость (3).

Следуя зависимости (2), за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью l можно пропорционально увеличивать скорость детали $V_{дет}$, сохраняя заданной температуру резания θ и увеличивая тем самым производительности обработки $Q = B \cdot t \cdot V_{дет}$ без уменьшения глубины шлифования t . Это открывает новые возможности осуществления на практике схемы высокопроизводительного многопроходного шлифования при одновременном обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Таким образом показано, что существуют различные направления уменьшения температуры резания θ и увеличения производительности обработки Q на основе использования прогрессивной

схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [5]). Наряду с уменьшением шероховатости поверхности [7], данная схема позволяет уменьшить и температуру резания θ , что, во-первых, обеспечивает высококачественную обработку, во-вторых, позволяет производить финишную обработку с более высокой производительностью без образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. При этом имеет место изменение направления образования рисков от проработавших зерен. Они образуются фактически вдоль обрабатываемой поверхности, а это положительно сказывается, например, на работоспособности обработанных поверхностей отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах, финишная обработка которых традиционно производится по схеме внутреннего шлифования периферией обычного абразивного круга с низким качеством обработки.

Результаты практического применения предложенного метода внутреннего шлифования поверхностей в пневмо- и гидроцилиндрах показали на его высокую эффективность. По показателям качества и производительности обработки данный метод шлифования превосходит применяемый метод обычного внутреннего шлифования и открывает новые возможности создания конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Выводы. Проведен теоретический анализ возможности уменьшения температуры резания при внутреннем шлифовании. Установлено, что увеличение длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью является важным фактором уменьшения температуры резания и, соответственно, повышения качества и производительности обработки. Эффект достигается в результате увеличения скорости детали. При этом глубина шлифования может оставаться постоянной, тогда как в традиционных схемах многопроходного шлифования увеличение скорости детали связано с уменьшением глубины шлифования при заданной производительности обработки. Этим показано, что за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью можно одновременно достигать уменьшения температуры резания и увеличения производительности обработки. Практической реализацией полученного решения является предложенный метод внутреннего шлифования, в котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Для снижения интенсивности трения в зоне шлифования предложено обработку производить кругами с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг

одновременно позволяет уменьшить шероховатость поверхности и температуру резания, что имеет большое теоретическое и практическое значение при финишной обработке отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах. Проведенные исследования показали, что применение предложенного метода внутреннего шлифования позволяет повысить качество и производительность за счет снижения теплонапряженности процесса резания. Установлено, что на обрабатываемых поверхностях отсутствуют температурные дефекты, а шероховатость обработанной поверхности составляет не более $Ra=0,04$ мкм. Это отвечает требованиям к изготовлению пневмо- и гидроцилиндров.

Список литературы:

1. Якимов А. В. *Прерывистое шлифование* / А. В. Якимов. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
2. Захаренко И. П. *Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой* / И. П. Захаренко, А. А. Шепелев. – Киев: Наук. думка, 1976. – 219 с.
3. Рыбицкий В. А. *Алмазное шлифование твердых сплавов* / В. А. Рыбицкий. – Киев : Наукова думка, 1980. – 223 с.
4. *Современные технологии и техническое перевооружение предприятий: монография* / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андиллахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Сергеев А. С. *Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах* / А. С. Сергеев // *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р. Харків. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 144–145
6. Сипайлов В. А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности* / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
7. Новиков Ф. В. *Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах* / Ф. В. Новиков, А. А. Андиллахай
8. А. С. Сергеев // *Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал*. – №3(84), июль – сентябрь 2019. – Беларусь, Минск, 2019. – С. 26–27

References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Preryvistoye shlifovaniye* [Intermittent grinding]. – Kiyev–Odessa, Izd. ob"yed. "Vishcha shkola". 175 s. (1986).
2. Zakharenko I. P., Shepelev A. A. *Almaznaya zatochka tverdosplavnogo instrumenta sovместno so stal'noy derzhavkoy* [Diamond sharpening of carbide tools together with a steel holder]. Kiyev, Naukova dumka. 219 s. (1976).
3. Rybitskiy V. A. *Almaznoye shlifovaniye tverdykh splavov* [Diamond grinding of hard alloys]. Kiyev, Naukova dumka. 223 s. (1980).
4. Novikov F.V., Zhovtobryukh V.A., Andilakhay A.A., Novikov D.F., Polyanskiy V. I. *Sovremennyye tekhnologii i tekhnicheskoye perevooruzheniye predpriyatiy* [Modern technologies and technical re-equipment of enterprises]: monografiya. Dnepr, LIRA. 400 p. (2018).
5. Sergeyev A. S. *Vysokoeffektivnaya tekhnologiya vnutrennego shlifovaniya otverstiy v pnevmo- i gidrotsilindrakh* [Highly efficient internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders] / *Resursozbezheniya ta enerhoeffektyvnist' protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Resource saving and energy efficiency of processes and equipment of pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy]: materialy

6. XI Mizhnarodnoyi naukovu-tekhnichnoyi konferentsiyi, prysvyachenoyi 90-richchyu zasnuvannya kafedry obrobky metaliv tyskom. – Kharkiv: NTU «KHP». 144-145 (2019).
7. Sipaylov V. A. *Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moskva, Mashinostroyeniye. 166 s. (1978).
8. Novikov F. V., Andilakhay A. A., Serhieiev A. S. *Usloviya umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti pri finishnoy*

abrazivnoy obrabotke otverstiy v tsilindrakh [Conditions for reducing surface roughness during finish abrasive treatment of holes in cylinders] / *Inzhener-mekhanik: Respublikanskiy mezhotraslevoy proizvodstvenno-prakticheskiy zhurnal* [Mechanical Engineer: Republican Intersectoral Production and Practice Journal]. 3(84), Belarus, Minsk. 26–27 (2019)/

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сергеев Олександр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: +38-068-78-08-555; e-mail: andilahayaa@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8974-9872>

ОХРИМЕНКО А.А., ГРУЩИНА Е.А., ПИВЕНЬ Л.В., СКИДАН Н.П.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Поверхностный слой в процессе скоростного зубофрезерования претерпевает неоднократное пластическое деформирование и приводит, в свою очередь, к изменению физико-механических свойств и структуры металла. В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется по изменению микротвердости по сечению детали и по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при послойном травлении исследуемой поверхности в зависимости от скорости резания. Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации происходит рост предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

Ключевые слова: Скоростное зубофрезерование, поверхностный слой, пластическое деформирование, глубина упрочненного слоя, скорость резания, предел прочности, предел текучести

ОХРИМЕНКО О.А., ГРУЩИНА О.О., ПИВЕНЬ Л.В., СКИДАН Н.П.

ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЯ ЗМІЦНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

Поверхневий шар в процесі швидкісного зубофрезерування зазнає неодноразове пластичну деформацію і призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей і структури металу. У відповідності з змінами, що відбуваються у поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається по зміні микротвердості по перерізу деталі і по зміні характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при посаровому травлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання. Швидкість різання виступає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності і межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі текучості знижує пластичність оброблюваного матеріалу і діє в бік зменшення ступеня зміцнення. З підвищенням температури і ступеня деформації швидкість протікання процесу знеміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу знеміцнення і зменшення ступеня зміцнення.

Ключові слова: Швидкісне зубофрезерування, поверхневий шар, пластичне деформування, глибина зміцненого шару, швидкість різання, границя міцності, границя текучості

OKHRIMENKO A.A., GRUSHCHINA E.A., PIVEN L.V., SKYDAN N.P.

TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF INCREASING THE DEGREE OF STRENGTHENING OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS

The surface layer during high-speed milling undergoes repeated plastic deformation and leads, in turn, to changes in the physico-mechanical properties and structure of metals. In accordance with changes in the surface layer, the depth of the hardened layer is determined by the change of microhardness across the section of the workpiece and to change the nature of the interference lines on radiographs during layer-by-layer etching of the sample surface depending on the cutting speed. The cutting speed is the factor that determines the speed of implementation of plastic deformation of the surface layer. With increasing strain rate increases tensile strength and yield strength of structural materials. The increase of the yield stress reduces the plasticity of the processed material and acts in the direction of decreasing the degree of hardening. With increasing temperature and the degree of deformation speed of the process of softening which occurs due to the recrystallization increases. The temperature of the cutting improves the intensity of the process of softening and reduction in the degree of hardening.

Keywords: Speed gear milling, surface layer, plastic deformation, the depth of the hardened layer, the cutting speed, the tensile strength, yield strength

1. Введение. Технологические факторы, влияющие на глубину и степени упрочнения поверхностного слоя в значительной степени зависят от многих технологических факторов – элементов режима резания, геометрических параметров инструмента и состояния его режущего лезвия зуба фрезы, свойств инструментального и обрабатываемого материалов, вида смазывающе-охлаждающих жидкостей и схемы охлаждения [1, 2, 3].

2. Основная часть. При всех методах механической обработки цилиндрических зубчатых колес на степень их упрочнения будут оказывать влияние силовой и температурный факторы (рис. 1).

Учитывая, что почти все инструменты (фрезы, оснащенные режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики, ролики), применяемые при механической обработке, имеют скругленный

рабочий участок с заданной величиной радиуса, для определения упрочнения поверхностного слоя от силового фактора произведем моделирование рабочей части фрезы сферическим индентором [5, 12, 14, 15]. При вдавливании сферического индентора в поверхность материала усилие, действующее на него, связано с диаметром отпечатка:

$$P = m d_0^n, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр отпечатка; m и n – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Выразив диаметр отпечатка через площадь пластического отпечатка, получим:

$$P = m \frac{4A_r}{\pi}^{n/2}. \quad (2)$$

Усилие деформирования в соответствии с разработанной теорией контактного взаимодействия:

$$P = c'k\sigma_T A_r. \quad (3)$$

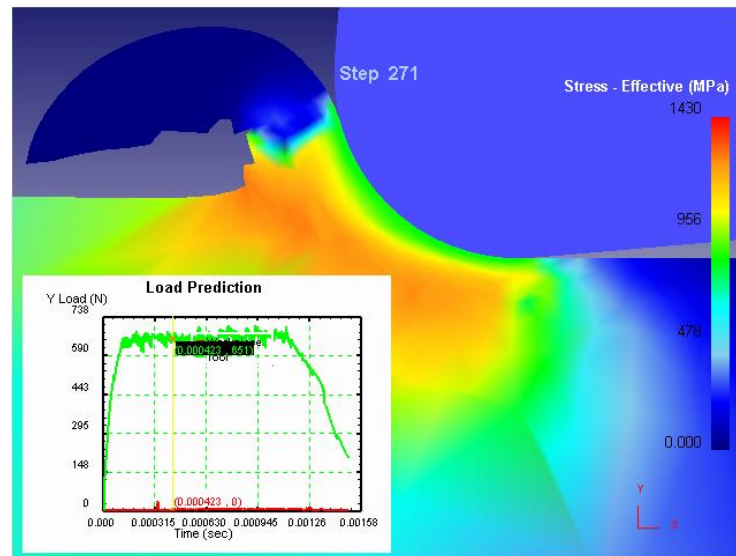


Рис. 1 – Изменение макронапряженности поверхностного слоя при внедрении режущего клина в обрабатываемую поверхность зубчатого колеса

Подставляя (2) в (3), получим уравнение для определения степени упрочнения:

$$k = \frac{m}{0,6c'\sigma_T} \left(\frac{4}{\pi}\right)^{n/2} A_r^{(n/2-1)}, \quad (4)$$

где 0,6 – коэффициент, учитывающий переход пластических деформаций на основание выступов шероховатости.

Таким образом, (3) является исходным для расчета степени упрочнения при зубофрезеровании без учета температурных изменений [2, 3].

Площадь A_r в каждом конкретном случае определяется условиями обработки. Коэффициенты m и n определяются при испытании на твердость по Раквеллу (HRC) при различных нагрузках. Так, для некоторых материалов значения этих коэффициентов приведены ниже:

Таблица 1 – Значение коэффициентов, определяющие твердость металла

Марка стали:	40	45	40X	18XН3А	34ХМ	3Х13	1Х18Н9Г	38Х1Н
m	44	56	63	135	75	61	40	63
n	2,32	2,31	2,32	2,31	2,29	2,31	2,26	2,32

При зубофрезеровании площадь контакта фрезы с обрабатываемым цилиндрическим зубчатым колесом, определяющая степень упрочнения:

$$A_r = \left[\arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{\rho}\right) + h_3 \frac{\Delta h_{yn}}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos\left(1 - \frac{R_z}{r}\right) \right] \quad (5)$$

где Δh – упруго-пластический оттесняемый слой обрабатываемого материала; h_3 – износ по задней поверхности фрезы; Δh_{yn} – величина упругого восстановления, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta h_{yn} = 2,4(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E}\right)^2. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим уравнение для расчета площади фактического контакта инструмента с заготовкой при зубофрезеровании:

$$A_r = \left[\arccos\left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1-\mu^2)}{\sin \alpha} \left(\frac{HB}{E}\right)^2 \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos\left(1 - \frac{R_z}{\rho}\right) \right] \quad (7)$$

При скоростном зубофрезеровании площадь контакта фрезы с заготовкой [4, 8, 9]:

$$A_r = \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + \frac{\pi \rho \arccos \left[1 - 24(1-\mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \frac{\pi \rho \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90} \quad (8)$$

При ППД обработке площадь фактического контакта инструмента с заготовкой:

$$A_r = \pi R \frac{t_{m \text{ иск}}}{100} \left(\frac{h_{пл}}{R_{p \text{ иск}}} \right)^{v_{иск}} \times \left\{ h_{киц} \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{пл}}{a_{пл}}}{180} + h_{упр} \left[1 - \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{пл}}{a_{пл}}}{180} \right] \right\} \quad (9)$$

Подставляя (7) в (4), получим уравнение для расчета степени упрочнения при лезвийной зубообработке от силового фактора:

$$k = \frac{m}{0,6c'\sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1-\mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right] \right\}^{(n/2-1)} \quad (10)$$

Для расчета степени упрочнения от силового фактора при скоростном зубофрезеровании [4, 6, 7, 15]:

$$k = \frac{m}{0,6c'\sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) \right] + \frac{\pi \rho \arccos \left[1 - 24(1-\mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \times \frac{\pi \rho \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90} \right\}^{(n/2-1)} \quad (11)$$

Взаимосвязь параметров поверхностей цилиндрических зубчатых колес (рис. 2) с условиями их обработки фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава, приведено в табл. 1.

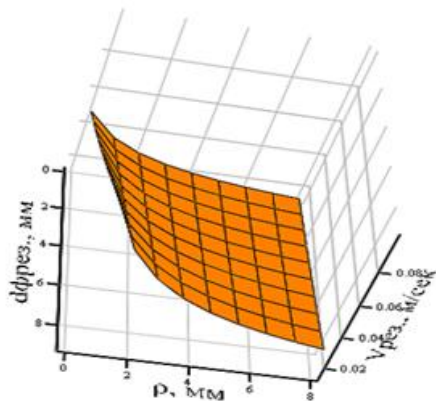


Рис. 2 – Многопараметрическая функция параметров формообразования при зубообработке (попутное фрезерование)

Влияние технологических факторов на параметры качества эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при скоростном зубофрезеровании фрезами [3, 10, 11, 13], оснащенными режущими пластинками из минералокерамики приведено в табл. 2.

Примечания:

1. Знак «+» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует увеличению или уменьшению определенного параметра качества поверхности.

2. Знак «-» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует уменьшению или увеличению определенного параметра качества поверхности.

3. Знак «0» обозначает, что изменение данного условия обработки не оказывает влияние на определенные параметры качества поверхности.

4. Знаком «*» помечены условия обработки, оказывающие основное влияние на определенные параметры качества поверхности. Так, для фрез с прецизионной доводкой по передним и задним поверхностям, заточенных алмазным кругом, радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 3 \dots 10 \text{ мкм}$, для червячных модульных фрез изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5, с износом по задней поверхности $0,1 \dots 0,3 \text{ мм}$ радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 20 \dots 60 \text{ мкм}$; для червячных модульных твердосплавных фрез Т15К6, ВК100М радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 80 \dots 450 \text{ мкм}$.

Рассмотренные факторы, воздействуя на деформацию поверхностного слоя, проявляются в зависимости от режимов резания, марки обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента и др.

Таким образом, металл, образующий поверхностный слой в процессе резания, претерпевает неоднократное пластическое деформирование. Это приводит, в свою очередь, к изменению всех физико-механических свойств и структуры металла. Согласно дислокационной теории, упрочнение металла при наклепе заключается в концентрации дислокаций около линий сдвигов. Атомные слои в месте расположения дислокаций упруго искажены таким образом, что возникает локальный концентратор напряжений. При пластической деформации число дислокаций в металле может увеличиться на несколько порядков. Если в недеформированном металле средняя плотность дислокаций $j = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, то в наклепанном металле она

возрастает до $j = 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В результате увеличения полей и происходит упрочнение металла при плотности дислокаций и взаимодействия их силовых пластическом деформировании [1, 3, 8].

Таблица 1 – Взаимосвязь параметров поверхностей цилиндрических зубчатых колес с условиями их обработки фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава

Условия обработки	Геометрические характеристики обработанной поверхности												Параметры физикомеханических свойств поверхностного слоя			
	Параметры шероховатости							Параметры волнистости			Параметры микро-отклонения					
	Ra	Rz	Rmax	Sm	S	tp	Rp	Wz	Wm	Smw	Hmax	Hp	Hμ0	hμ	σ0	hσ
Подача S, мм/мин < 50 ≥ 50	0 +*	0 +*	0 +*	+* +*	+* +*	0 0	- +*	0 +*	0 +*	0 +*	0 +*	0 +*	+	+	+	+
Скорость резания v, м/с < 0,80 ≥ 0,80	+* -*	+* -*	-* -	+ -*	+ -*	- -	+* -*	+* -*	-* -	-* +	- +	-* +	-* +	+	+	+
Глубина резания t			+*			+			+*	+*	+*	+*	+*			
Передний угол фрезы > 0 < 0	- +*	- +*		- +*	- +*	0	+* +*	+* +*	+* +	+*					+*	+*
Радиус скругления режущей кромки ρ			+*			+							+*			
Шероховатость режущей кромки R _{зкр}			-			0			+	+	+*	+	+	+	+	+
Жесткость системы ДТСС	+*	+*	+	+*	+	0	+	+	0	0	+0	+	0	0	0	0

Таблица 2 – Влияние технологических факторов на параметры качества эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при скоростном зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из минералокерамики

Условия обработки	Геометрические характеристики обработанной поверхности												Параметры физикомеханических свойств поверхностного слоя			
	Параметры шероховатости							Параметры волнистости			Параметры микроотклонения					
	Ra	Rz	$Rmax$	Sm	S	tp	Rp	Wz	Wm	Smw	$Hmax$	Hp	$H\mu 0$	$h\mu$	$\sigma 0$	$h\sigma$
Минутная подача $S_{мин}$	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Подача на оборот S_o	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Подача на зуб фрезы S_z	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Встречное фрезерование	+	*	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		0	+	+
Попутное фрезерование	-	-	-	0	0		+	+	+	+	+	+	0	0	0	0
Жесткость системы ДТСС	-	-	-			0	-	+	-	0	-	-	-	-	-	-
Предел текучести материала заготовки σ_t	-	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Исходная волнистость $W_{zисх}$	+	+	+	+	+	-	+	0	0	0	0	+	+	+	+	+
Исходное макроотклонение $H_{max исх}$	0	0	0	0	0								+	+		
Исходная шероховатость $Rz исх$	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	+	+

Причиной деформации поверхностного слоя (а следовательно, и упрочнения) является то, что резание металлов осуществляется зубом фрезы с радиусом округления режущей кромки ρ и частичное упругое восстановление несрезанного деформированного металла. Таким образом, металл, образующий поверхностный слой в процессе резания, претерпевает неоднократное пластическое деформирование. Это приводит, в свою очередь, к изменению всех физико-механических свойств и структуры металла. Согласно дислокационной теории, упрочнение металла при наклепе заключается в концентрации дислокаций около линий сдвигов. Атомные слои в месте расположения дислокаций упруго искажены таким образом, что возникает локальный концентратор напряжений. При пластической деформации число дислокаций в металле может увеличиться на несколько порядков. Если в недеформированном металле средняя плотность дислокаций $j = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, то в наклепанном металле она возрастает до $j = 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В результате увеличения плотности дислокаций и взаимодействия их силовых полей и происходит упрочнение металла при пластическом деформировании [1, 3, 8].

Степень упрочнения характеризуется глубиной пластически деформированного поверхностного слоя h_c и степенью наклепа N , определяемой по формуле:

$$N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где H_1 – микротвердость детали непосредственно с поверхности; H – микротвердость поверхностного слоя на глубине залегания h_c .

В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется или по изменению микротвердости по сечению детали, или по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при послойном сравнении исследуемой поверхности.

Применительно к встречному зубофрезерованию формула для определения глубины наклепанного слоя имеет следующий вид:

$$h_n = \frac{1 - \sin \beta}{2 \sin \beta} \cdot \sin \psi_{\tilde{n}\tilde{e}}, \quad (13)$$

где $\psi_{\tilde{n}\tilde{e}}$ – угол скольжения.

Угол сдвига β рассчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \cdot \sin \psi_{\text{ск}}, \quad (14)$$

где ξ – усадка стружки; γ – передний угол фрезы.

Формула (12) справедлива, когда отношение глубины относительного внедрения, приводящего к резанию без применения смазки, соответствует $a_i/\rho \geq 0,5$, а со смазкой – $a_i/\rho \geq 0,31$. Толщина срезаемого слоя $a_i = S_z \cdot \sin \psi_{\text{ск}} \cdot \sin \varphi$.

Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации, как известно, происходит рост

предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения.

Скорость резания определяет продолжительность контакта задней поверхности фрезы с изделием. При большой скорости резания поверхность детали проходит через зону контакта, не получив степени упрочнения, который она могла бы получить при малой скорости резания и более продолжительном контакте.

При повышении скорости резания до некоторой величины происходит сужение пластической зоны и уменьшение глубины ее распространения ниже линии среза. То и другое действует в сторону уменьшения степени упрочнения [1, 12].

Скорость резания, как температурный фактор, изменяет степень развития нароста при зубофрезеровании червячными модульными фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 и характер обтекания и подминания металла из зоны стружкообразования в сторону задней грани. Степень упрочнения увеличивает действительный радиус округления режущей кромки и тем самым способствует повышению наклепа.

Скорость резания влияет на изменение интенсивности процесса разупрочнения (Рис. 3).

При пластическом деформировании в поверхностных слоях металла происходят два одновременно протекающих процесса: степень упрочнения и разупрочнение. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

При встречном зубофрезеровании на угле скольжения зуба фрезы $\psi_{\text{ск}}$ повышение температуры контакта до температуры, соответствующей максимальному охрупчиванию, будет способствовать снижению степени упрочнения, а дальнейшее повышение температуры должно действовать в сторону повышения наклепа, т. к. пластичность в этом случае повышается.

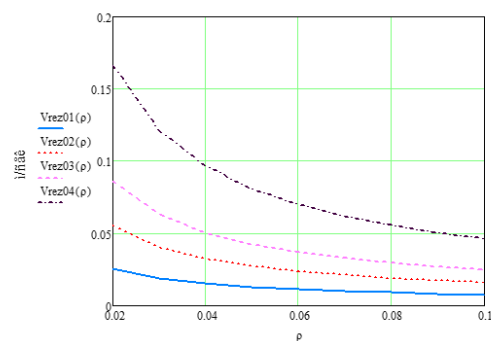


Рис. 3 – График зависимости параметров формообразования от радиуса округления режущей кромки фрезы

Выводы. В процессе скоростного зубофрезерования поверхностный слой претерпевает неоднократное пластическое деформирование и приводит, в свою очередь, к изменению физико-механических свойств и структуры металла. В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется по изменению микротвердости по сечению детали и по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при послойном сравнении исследуемой поверхности в зависимости от скорости резания. Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации происходит рост предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

Список литературы:

1. Ключко А. А. *Технологическое основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес* [Текст] / А. А. Ключко, А. Н. Кравцов. Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.
2. Шелковой А. Н. *Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес* / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185–200. – Укр., рос., англ. мовами.
3. Мироненко Е. В. *Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек* / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем*: сб. науч. тр. – Краматорск: К.: ДГМА, 2008. – Вип. 23. – С. 69–73.
4. *Масляная СОЖ при зубообработке: эффективность и перспективы их применения*. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. Г. Суслов, А. А. Ключко [и др.] // *Международный информационно-технический журнал*. – Харьков, 2008. – № 5. – С. 70–73.
5. Шелковой А.Н., Пермяков А.А., Ключко А.А., Басова Е.В., Перминов Е.В. *Глобальный метод повышения эффективности эксплуатации цилиндрических и конических зубчатых 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. – № 34 (1310) 2018. – С. 67–76. – ISSN 2079-004X.
6. Ключко О.О., Шелковий О.М., Лоза Р.І, Півень Л.В. *Технологія автоматизованого виробництва в системі проектування керуючих процесів для верстатів з ЧПУ*. 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. 75–77.

7. 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.
8. Новіков Ф.В., Ключко О.О., Охріменко О.А., Анциферова О.О., Басова С.В. *Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування*. 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. 127–132. – ISSN 2079-004X.
9. *Застосування CAD систем при визначенні параметрів зрізюмого шару при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами* / Н.С. Равська, О.О. Ключко, О.А. Охріменко // *Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції*, 5-9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 135–137.
10. *Актуальность дифференцированного и комплексного прогнозирования в условиях имитационного моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, А.А. Охрименко, М.И. Гасанов // *Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції*, 5-9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 127–129.
11. Степанов М. С. *Многокритеріальна регламентація параметрів поверхностного слоя деталей* / М. С. Степанов, А. А. Ключко, А.Н. Кравцов // *Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Международной научно-практической конференции*. 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира, 2015. – С. 68–76. – ISBN 978-966-383-658-4.
12. Ratnadeepsinh, M.J., Dispeshkumar M.C., & Jignesh D.L. (2013). *Bending Stress Analysis of Bevel Gears*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2(7), 341-346.
13. Artani, M. Gabiccini, M. Kolivand. *Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears: only the pinion needs corrections*. Mech. Mach. Theory 61 (2013) 84–101.
14. Z. Zhou, J. Tang, H. Ding. *Accurate modification methodology of universal machine tool settings for spiral bevel and hypoid gears*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 232 (2) (2018) 339–349.
15. V. Simon. *Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors*. Chin. J. Aeronaut. 26 (2013) 777–790.

References (transliterated)

1. Klochko A. A. *Tekhnologicheskoe osnovy` obespecheniya proczessa zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles* [Tekst] / A. A. Klochko, A. N. Kravczov. Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitel`naya akademiya; Zakry`toe akczionernoe ob-vo "ONIKS" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONIKS, 2014 – 299 s.: il., tabl.; - (Seriya: «Proektirovanie i primenenie rezhushhego instrumenta v mashinostroenii» / Obshh. red. Yu.M. Solomenczev). ISBN 978-5-906703-02-6.
2. Shelkovej A. N. *Kriterii formirovaniya struktur i parametrov sistem obrabotki, obespechivayushhih zadanny`e e`ksploataczionny`e svojstva zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles* / A. N. Shelkovej, E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu «Kharki`vs`kij poli`tekhnichnij i`nstytut»*: zb. nauk. pr. Tematichnij vipusk: Suchasni` tekhnologii`yi v mashinobuduvanni`. – Kharki`v: NTU KhPI, 2013. – Vip. 8. – S. 185–200. – Ukr., ros., angl. movami.
3. Mironenko E. V. *Topografiya iznosa zubonarezного instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek* / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya*

- tehnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy'p. 23. – S. 69–73.
4. Maslyanaya COZh pri zuboobrabotke: e'ffektivnost' i perspektivy ikh primeneniya. Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlya professionalov/ E. V. Mironenko, A. G. Suslov, A. A. Klochko [i dr.]/ Mezhdunarodny'j informacziionno-tehnicheskij zhurnal. – Khar'kov, 2008. – # 5. – S. 70–73.
 5. Shelkovej A.N., Permyakov A.A., Klochko A.A., Basova E.V., Perminov E.V. Global'ny'j metod pov'y'sheniya e'ffektivnosti e'kspluatatsii czilindricheskikh i konicheskikh zubchaty'kh peredach// Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu «KhPI». Seri'ya: Tekhnologiyi v mashinobuduvanni – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr./ Nacz. tekhn. un-t «Kharkiv. poli'tekhn. i'n-t». — Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. — # 34 (1310) 2018. — S. 67–76. — ISSN 2079-004Kh.
 6. Klochko O.O., Shelkovij O.M., Loza R.I., Pi'ven L.V. Tekhnologiya avtomatizovanogo virobnicstva v sistemi' proektuvannya keruyuchikh procesi'v dlya verstativ z ChPU. Mashinobuduvannya ochima molodikh: progresivni' i'deyi – nauka – virobnicstvo. Materi'ali mi'zhnarodnoyi naukoivo-praktichnoyi konferenczi'yi 31 zhovtnya – 02 listopada 2018 roku/ Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 75–77.
 7. Permyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. Matematicheskaya model' sinteza tekhnologicheskogo reglamenta vosstanovleniya funkczional'ny'kh svojstv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh peredach. XI'Kh Mi'zhnarodna naukoivo-tekhni'chna konferenczi'ya «Progresivna tekhnika, tekhnologiya ta i'nzhenerna osvita», 29 chervnya – 01 lipnya 2018 roku v Naczi'onal'nomu tekhnichnomu uni'versiteti' Ukrayini «Kiyiv's'kij poli'tekhnichnij i'nstitut i'meni' I'goria Si'kors'kogo». – Kiyiv: NTUU «KPI», 2018. – T. 4. – S. 348–350.
 8. Novikov F.V., Klochko O.O., Okhri'menko O.A., Anciferova O.O., Basova Ye.V. Matematichna model' teplonapruzhenosti' procesu i'mpul'snogo pererivchastogo shli'fuvannya. Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu «KhPI». Seri'ya: Tekhnologiyi v mashinobuduvanni' Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr./ Nacz. tekhn. un-t «Kharkiv. poli'tekhn. i'n-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. – # 6 (1282) 2018. – S. 127–132. — ISSN 2079-004Kh.
 9. Zastosuvannya CAD sistem pri viznachenni'ya parametri'v zri'zayemogo sharu pri zubofrezeruvanni' cherv'yachnimi frezami/ N.S. Rav's'ka, O.O. Klochko, O.A. Okhri'menko// Zbi'mnik naukovikh prac'v. Progresivni' tekhnologiyi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VI'g-oyi Vseukrayins'koyi naukoivo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi, 5-9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'vi'vs'ka poli'tekhnika». – L'viv, 2018. – S. 135–137.
 10. Aktual'nost' differenczirovannogo i kompleksnogo prognozuvannya v usloviyakh imitacziionnogo modelirovaniya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluatacziynny'kh svojstv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles/ A.A. Permyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, A.A. Okhri'menko, M.I. Gasanov// Zbi'mnik naukovikh prac'v. Progresivni' tekhnologiyi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VI'g-oyi Vseukrayins'koyi naukoivo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi, 5-9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'vi'vs'ka poli'tekhnika». – L'viv, 2018. – S. 127–129.
 11. Stepanov M. S. Mnogokriterial'naya reglamentacziya parametrov poverkhnostnogo slova detalej/ M. S. Stepanov, A. A. Klochko, A.N. Kravczov// Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii. Trudy' 21-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii. 24–25 dekabrya 2015, g.Khar'kov. – D.: Lira, 2015. –S. 68–76. – ISVN 978-966-383-658-4.
 12. Ratnadeepsinh, M.J., Dispeshkumar M.C., & Jignesh D.L. (2013). Bending Stress Analysis of Bevel Gears. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2(7), 341-346.
 13. Artoni, M. Gabiccini, M. Kolivand. Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears: only the pinion needs corrections. Mech. Mach. Theory 61 (2013) 84–101.
 14. Z. Zhou, J. Tang, H. Ding. Accurate modification methodology of universal machine tool settings for spiral bevel and hypoid gears. Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 232 (2) (2018) 339–349.
 15. V. Simon. Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors. Chin. J. Aeronaut. 26 (2013) 777–790.

Поступила (received) 05.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Охрименко Александр Анатольевич, Ohrimenko Oleksandr) – доктор технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Грущина Олена Олександрівна (Грущина Елена Александровна, Grushchina Elena Alexandrovna) – магістр, Columbia University, м. Нью Йорк, e-mail: borbasp@gmail.com

Півень Лариса Володимирівна (Пивень Лариса Владимировна, Piven Larisa Vladimirovna) – магістр, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, e-mail: pivenolesy1971@gmail.com

Скидан Наталія Павлівна (Скидан Наталия Павловна, Skydan Nataliia Pavlivna) – інженер кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», м. Харків; тел.: (067)315-21-02; e-mail: s-n-p@i.ua, ORCID: 0000-0002-1775-1447

СИЗЫЙ Ю.А., СТАЛИНСКИЙ Д.В., ЧАЙКА Э.Г., УШАКОВ А.Н., ЩЕРБИНИНА Т.Е.

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

В статье представлено определение и численный расчет параметров математической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением мод. 2ПД100МУХЛ4. Моделирование выполнено на основе разработанной структурной схемы двигателя в виде передаточных функций и связей между ними, что позволило получить визуальное наблюдение за угловой скоростью ω ротора двигателя и током якорной цепи J_a . В соответствии с ограничениями J_a в зависимости от продолжительности работы двигателя в установившемся режиме получено максимально допустимое значение момента сопротивления на роторе двигателя равное 5Н·м. Модель двигателя дополнена устройствами обратной связи по скорости – тахогенератором и тиристорным преобразователем, а также электронным потенциометром, что в совокупности позволяет уменьшить всплески тока в переходных режимах и обеспечить стабильное значение настраиваемой скорости ω . Полученные результаты позволяют выполнить анализ динамики крутильной системы привода вращения заготовки без упрощения модели двигателя, как это обычно делается.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока; математическая модель; режим пуска, режим установившегося состояния; передаточная функция; момент сопротивления.

СИЗИЙ Ю.А., СТАЛИНСЬКИЙ Д.В., ЧАЙКА Е.Г., УШАКОВ О.М., ЩЕРБИНИНА Т.Є.

РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ ОБЕРТАННЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА

У статті подано визначення та чисельний розрахунок параметрів математичної моделі двигуна постійного струму з незалежним збудженням мод. 2ПД100МУХЛ4. Моделювання виконано на основі розробленої структурної схеми двигуна у вигляді передавальних функцій і зв'язків між ними, що дозволило отримати візуальне спостереження за кутовий швидкістю ω ротора двигуна і струмом якорного ланцюга J_a . Згідно з обмеженнями J_a в залежності від тривалості роботи двигуна в усталеному режимі отримано максимально допустиме значення моменту опору на роторі двигуна рівне 5Н·м. Модель двигуна доповнена пристроями зворотного зв'язку по швидкості – тахогенератором і тиристорним перетворювачем, а також електронним потенціометром, що в сукупності дозволяє зменшити сплески струму в перехідних режимах і забезпечити стабільне значення налагоджувальної швидкості ω . Отримані результати дозволяють виконати аналіз динаміки крутильної системи приводу обертання заготовки без спрощення моделі двигуна, як це зазвичай робиться.

Ключові слова: двигун постійного струму; математична модель; режим пуску, режим сталого стану; передатна функція; момент опору.

SIZY J.A., STALINSKY D.V., CHAYKA E.G., USHAKOV A.N., SCHERBININA T.E.

CALCULATION AND RESEARCH STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS ELECTRIC MOTOR DRIVE OF ROTATION BLANK IN CIRCULAR GRINDING MACHINE TOOL

The article definition and numerical calculation of parameters of mathematical model of the drive of a direct current with independent excitation of model 2ПД100МУХЛ4 is presented. Simulation is executed on the basis of the designed block diagramme of the drive in the form of transmitting functions and links between them that has allowed to receive visual observation of an angular velocity ω a rotor of the drive and a current of anchor circuit J_a . According to limitations J_a depending on operation time of the drive in a steady run the acceptable value of the moment of resistance on a drive rotor equal 5Н·м is received as much as possible. The drive model is added by feedback devices on speed - the generator and the thyristor the converter, and also an electronic potentiometer that in aggregate allows to diminish current splashes in transitive conditions and to ensure stable value of adjusted speed ω . The received results will allow to make the analysis of dynamics of torsional system of a roll drive of preform without simplification of model of the drive as it usually becomes.

Keywords: motor of direct current; mathematical model; starting regime, regime steady state; transe function; moment of resistance.

1.

Введение. Электродвигатель постоянного тока представляет собой важнейший элемент привода вращения обрабатываемой заготовки в круглошлифовальных станках. Обычно это двигатель с независимым возбуждением и обеспечивает бесступенчатое изменение частоты его вращения изменением напряжения подаваемое на обмотку якоря в сторону его уменьшения от номинального значения в 220 В.

Полную информацию о двигателе необходимую для управления приводом подачи заготовки можно получить на структурной его модели представляющей соединение элементов модели при помощи передаточных функций и сумматоров.

Разработке этой модели и посвящена настоящая статья с анализом поведения важнейших ее элементов – тока якорной цепи, частоты вращения ротора, момента сопротивления на роторе

двигателя в установившемся и переходных режимах работы двигателя.

Литературный обзор. Рассмотренная в статье модель электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением предлагает в дальнейшем использование ее в модели привода вращения заготовки круглошлифовального станка.

В принятой в середине прошлого века методике исследования приводов вращения станков [7] электродвигатель представлялся как устройство, обеспечивающее электромагнитную связь ротора и статора описываемую жесткостью или податливостью этой связи. Такое описание лишает исследователя наблюдения во времени за важнейшими параметрами двигателя и привода в различных режимах их работы.

В более поздней литературе [2] модель двигателя представлена наиболее полно системой дифференциальных уравнений ДУ, которая может

быть непосредственно использована для составления схемы набора на аналоговой вычислительной машине (АВМ).

В современной литературе [1,6] и др. модель двигателя в виде системы ДУ решается как на АВМ, так и на современных ЭВМ.

В предлагаемой в статье модели двигателя, в виде структурной схемы состоящей из блоков с передаточными функциями и связями между ними удобна для визуального наблюдения за всеми сигналами модели, в частности в пакете прикладных программ Vissim, что позволяет управлять ими в различных режимах работы двигателя.

3. Цель и задачи исследования. Получить информацию о поведении параметров двигателя визуальным моделированием в установившихся и переходных режимах его работы решив следующие задачи:

1) обеспечить величину всплеска тока якоря не выше допустимого из условия нагрева его обмоток;

2) установить максимальное значение момента сопротивления ограниченное током якоря;

3) получить зависимость напряжения U , подаваемое на двигатель в зависимости от требуемой (настраиваемой) частоты ω вращения ротора с учетом обратной связи по скорости.

4. Изложение основного материала. Статические и динамические характеристики привода вращения заготовки круглошлифовального станка в значительной степени определяются электродвигателем этого привода. Обычно это двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, обеспечивающим бесступенчатое регулирование частоты вращения заготовки.

Современные круглошлифовальные станки и, в частности станок 3М152ВФ20 с электродвигателем привода заготовки 2ПД100МУХЛ4, оборудованы программным управлением, которое позволяет программно задавать частоту вращения заготовки и поддерживать ее при изменяющемся моменте шлифования, приложенном к заготовке.

Анализировать статические и динамические свойства двигателя 2ПД100МУХЛ4 наиболее полно можно по известной математической модели в виде системы дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{dJ_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} J_{\text{я}} + E &= U; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_g - M_c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь в (1) U – напряжение постоянного тока, подаваемое на якорь, которое является входом в двигатель; $R_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$ – сопротивление и индуктивность якорной цепи. Напряжение E , возникающее в обмотке якоря в результате вращения его в магнитном поле статора называют противо ЭДС и вычисляют следующим образом:

$$E = K \cdot \phi \cdot \omega, \quad (2)$$

где K – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров двигателя;

ϕ – магнитный поток возбуждения;

ω – угловая скорость двигателя.

Т.к. рассматриваемый двигатель с независимым возбуждением, то принимаем ϕ неизменным и

$$E = C_e \cdot \omega, \quad (3)$$

где $C_e = K \cdot \phi$.

Таким образом, согласно (1) напряжение, подаваемое на якорь двигателя расходуется на преодоление активного сопротивления, индуктивного и противо ЭДС.

Второе уравнение системы (1) – это уравнение движения двигателя, где

J – момент инерции всех вращающихся масс приведенных к валу движения;

M_g – момент развиваемый двигателем:

$$M_g = C_m J_{\text{я}}. \quad (4)$$

M_c – момент сопротивления приложенный к валу двигателя.

Наиболее полно выявить статические и динамические свойства двигателя удобно моделированием, например, в пакете визуального моделирования Vissim [3], при известных параметрах $R_{\text{я}}$, $J_{\text{я}}$, C_e , C_m , J и моменте сопротивления M_c .

В справочнике по электрическим машинам [4] приводятся все данные двигателей серии 2П:

N_n – мощность номинальная, кВт;

U_n – номинальное напряжение сети, В;

n_n – номинальная частота вращения, мин⁻¹;

η – коэффициент полезного действия, %;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом (при 15° С);

$R_{\text{гп}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность инерции якоря, мГн.

J – момент инерции якоря, кг·м².

Параметры C_e и C_m не приводятся и рассчитываются из номинальных значений перечисленных данных двигателя.

Сопротивление якорной цепи

$$R_{\text{яя}} = 1,2(R_{\text{я}} + R_{\text{гп}}) + R_{\text{щ}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{щ}}$ – щеточное сопротивление, Ом;

1,2 – коэффициент, учитывающий нагрев обмоток;

$$R_{\text{щ}} = 2 / J_{\text{яя}}, \quad (6)$$

где $J_{\text{яя}}$ – номинальный ток якорной цепи, который вычисляется следующим образом:

$$J_{\text{яя}} = \frac{N_n \cdot \eta}{U_n}, \text{ А.} \quad (7)$$

Значение C_e рассчитывается из статической электромеханической характеристики электродвигателя, т.е. из первого уравнения системы

$$(1) \text{ при отсутствии слагаемого } L_{\text{я}} \frac{dJ_{\text{я}}}{dt}.$$

Перепишем это уравнение с номинальными значениями параметров:

$$R_{\text{яя}} \cdot J_{\text{яя}} + C_e \cdot \omega_n = U_n, \quad (8)$$

и из (8) получаем:

$$C_e = \frac{(U_n - R_{\text{яя}} \cdot J_{\text{яя}})}{\omega_n}, \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (9)$$

Коэффициент C_m обычно очень близок численно к C_e , но с другой размерностью, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$. Зная C_m можно рассчитать номинальный момент развиваемый двигателем:

$$M_n = C_m \cdot J_{ня} \cdot \quad (10)$$

Двигатель 2ПД100МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные:

$N_n=0,85$ кВт, $U_n=220$ В, $n_n=2360$ мин⁻¹=247,14 рад/с, $\eta=78\%$, $R_{я}=1,99$ Ом, $R_{gn}=1,22$ Ом, $L=78$ мГн, $J=0,011$ кг·м².

Согласно (7) $J_{ня}=3,01$ А; согласно (6) $R_{ц}=0,66$ Ом; и согласно (5) $R_{ня}=4,52$ Ом.

Коэффициент C_e получим из (9) равным 0,83 В·с/рад и соответственно $C_m=0,83$ Н·м/А.

Таким образом, имеются все числовые параметры системы (1), что позволяет визуальным моделированием проанализировать статические и динамические характеристики рассматриваемого двигателя.

Визуальное моделирование двигателя можно выполнить двумя методами: 1) решая систему уравнений (1) методом понижения производной; 2) сформировав структурную схему модели соединением передаточных функций элементов системы (1).

Для реализации метода понижения производной необходимо разрешить уравнения (1) относительно старших производных и проинтегрировать эти производные, используя стандартные блоки пакета Vissim [3].

Более наглядный анализ получаем, если систему (1) представить в виде структурной схемы, т.е. как сочетание передаточных функций ее элементов с прямыми и обратными связями, что также можно реализовать в пакете Vissim.

Воспользуемся вторым методом для чего из первого уравнения системы (1) запишем:

$$\frac{L_{я}}{R_{я}} \frac{dJ_{я}}{dt} + J_{я} + \frac{1}{R_{я}} E = \frac{1}{R_{я}} U. \quad (11)$$

Преобразуем (11) по Лапласу при нулевых начальных условиях [5]:

$$\frac{L_{я}}{R_{я}} S \cdot J_{я}(S) + J_{я}(S) = \frac{1}{R_{я}} (U(S) - E(S)); \quad (12)$$

где S – комплексная переменная $S = C + i\omega$, $J_{я}(S)$, $U(S)$, $E(S)$ преобразования Лапласа функций времени соответственно $J_{я}(t)$, $U(t)$, $E(t)$.

Величину $\frac{L_{я}}{R_{я}}$ называют электромагнитной постоянной времени и обозначают $T_{э}$.

Введя $T_{э}$ и вынеся $J_{я}(S)$ из левой части (12) получаем:

$$J_{я}(S)(T_{э} \cdot S + 1) = \frac{1}{R_{я}} (U(S) - E(S)) - \frac{1}{R_{я}} U(S) - \frac{1}{R_{я}} E(S)$$

$$J_{я}(S) = \frac{1/R_{я}}{T_{э} \cdot S + 1} U(S) - \frac{1/R_{я}}{T_{э} \cdot S + 1} E(S) \quad (13)$$

Согласно (13) уравнение (11) может быть представлено структурной схемой следующего вида:

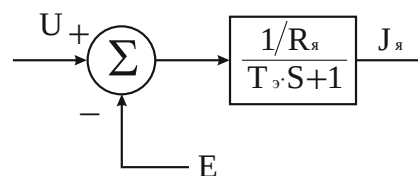


Рис. 1 – Элемент структурной схемы согласно (13)

Согласно второго уравнения системы (1) ток якоря $J_{я}$ умноженный на C_m дает момент развиваемый двигателем M_g и схему на рис. 1 можно дополнить пропорциональным безинерционным звеном с коэффициентом передачи C_m .

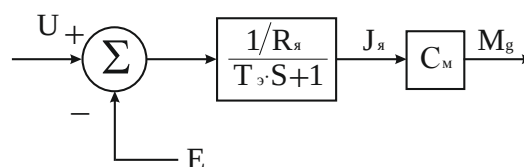


Рис. 2 – Элемент схемы рис.1 дополненный моментом сопротивления $M_g = C_m J_{я}$

Рассмотрим второе уравнение системы (1):

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m J_{я} - M_c = M_g - M_c. \quad (14)$$

Преобразуем (14) по Лапласу при нулевых начальных условиях:

$$J \cdot S \cdot \omega(S) = M_g(S) - M_c(S).$$

Запишем следующую передаточную функцию:

$$W(S) = \frac{\omega(S)}{M_g(S) - M_c(S)} = \frac{1/J}{S}. \quad (15)$$

Выходным сигналом этой передаточной функции является ω , а входным $M_g - M_c$. Следовательно, чтобы получить ω нужно от M_g на рис. 2 отнять M_c и подать эту разность на блок с передаточной функцией $\frac{1/J}{S}$. Полученный сигнал ω пропорциональным безинерционным звеном с коэффициентом передачи C_e преобразуется в противо ЭДС E , которая по отрицательной обратной связи подается на сумматор, на который приходит задаваемое напряжение U . Таким образом, получается структурная схема модели двигателя, показанная на рис. 3.

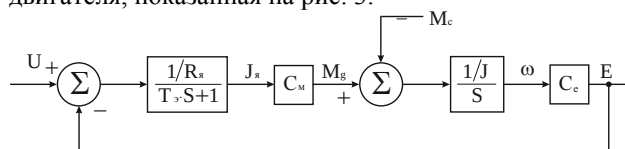


Рис. 3 – Полная структурная схема двигателя

Блок-схема модели двигателя согласно рис. 3 с параметрами, полученными выше к двигателю 2ПД100МУХЛ4, приведена на рис. 4.

На вход блок – схемы моделирования подается ступенчатый сигнал U обозначенный как U_z равный номинальному его значению 220 В.

Возмущающее воздействие на двигатель это момент сопротивления M_c . На рис. 4 M_c подается ступенчатым сигналом равным 5Н·м с задержкой по времени на 0,8 сек.

В [4] указывается $J_{\text{я}}$ допустимое для различных режимов работы двигателя. При длительной эксплуатации предельно допустимый ток якоря не должен превышать $(0,9 \div 1)J_{\text{ня}}$. Кратковременная перегрузка в течении 60 сек. допускает значение тока равное $2 \cdot J_{\text{ня}}$, а в течении 10 сек – $4 \cdot J_{\text{ня}}$.

При врезном шлифовании, продолжительность операции которого не превышает 60 сек, предельно допустимое значение $J_{\text{я}} = 2 \cdot J_{\text{ня}} = 2 \cdot 3,01 = 6,02$ А.

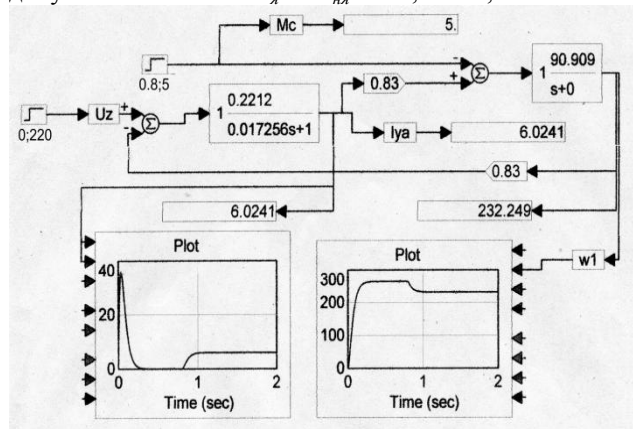


Рис. 4 – Структурная схема модели двигателя с численными параметрами ее и результатами моделирования в пакете Vissim

Блок – схему моделирования двигателя 2ПД100МУХЛ4 с численными ее параметрами согласно рис.3 в пакете Vissim, выбрав метод, шаг и время интегрирования, задав момент сопротивления M_c ступенчатым сигналом с задержкой на 0,8 сек величиной 5Н·м, а входной сигнал ступенчатым сигналом равным номинальному значению напряжения U , т.е. 220 В, выполняем моделирование, результаты которого приведены на рис. 4.

Эти результаты представлены на рис. 4 графиками изменения тока в якорной цепи $J_{\text{я}}$ и ω_1 .

При пуске двигателя $J_{\text{я}}$ сначала резко возрастает до 35 А, а затем до нуля и при подаче $M_c = 5$ Н·м он снова вырастает до 6,02 А и устанавливается на этом значении.

Таким образом, подобранное значение $M_c = 5$ Н·м является предельно допустимым для работы двигателя 2ПД100МУХЛ4 в приводе заготовки круглошлифовального станка.

Из правого графика рис. 4 видно, что после подачи возмущающего воздействия $M_c = 5$ Н·м частота вращения двигателя заметно падает с 268 рад/с до 232 рад/с. В тоже время для рационального (в идеале оптимального) управления циклом круглого наружного врезного шлифования (КНВШ) необходимо поддерживать неизменной скорость вращения заготовки при изменяющихся значениях момента резания.

Современные круглошлифовальные станки, и в частности станок 3М152ВФ20, оборудованы системой числового программного управления (ЧПУ) режимами обработки, и в частности частотой вращения заготовки. Система ЧПУ реализует обратную связь по скорости, что позволяет поддерживать скорость заготовки практически неизменной при изменяющемся моменте шлифования.

Обратная связь по скорости в управлении двигателем 2ПД100МУХЛ4 реализуется тахогенератором T_g сравнивающим устройством (сумматором) и тиристорным преобразователем T_p .

Устройства T_p , T_g являются электронными, описываемые передаточной функцией аperiодического звена первого порядка [6]. Постоянные времени этих устройств, определяющих их инерционность, очень малы (сотни доли секунды [6]) и зачастую принимаются равными нулю. Таким образом T_p и T_g принимаются как безинерционные пропорциональные звенья, передаточные функции которых это коэффициенты передачи соответственно K_{mp} , K_{mg} . На рис. 5 показана блок – схема модели двигателя, дополненная передаточными функциями устройств обратной связи.

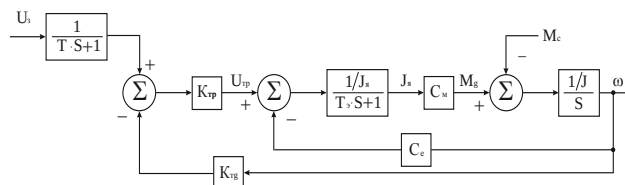


Рис. 5 – Блок – схема модели двигателя с обратной связью по скорости

Обратившись к рис. 4 мы видим, что U_z ступенчато подаваемое на вход двигателя приводит к всплеску тока якоря до ≈ 35 А. Такой ток превышает допустимый при кратковременной перегрузке двигателя в течении менее 10 сек равный $4 \cdot J_{\text{ня}} = 4 \cdot 3,01 \approx 12$ А.

Поэтому для уменьшения такого всплеска напряжение U_z подается через аperiодическое звено первого порядка с постоянной времени T величина которой подбирается так, чтобы не превышать величину всплеска тока в 12 А.

В паспорте станка 3М152ВФ20 не приводятся численные значения T , K_{mp} , K_{mg} и поэтому они подобраны такими, которые обеспечивают желаемые условия работы двигателя, т.е. стабильное значение частоты вращения двигателя ω_1 при изменяющемся M_c . Эти значения следующие $K_{mp} = 10$, $K_{mg} = 1$, $T = 0,4$ сек.

На рис. 6 приведена блок – схема модели в пакете Vissim с аperiодическим звеном на входе и передаточными функциями устройств обратной связи.

Из графиков рис. 6 видно, что входное напряжение растет по экспоненте от нуля до заданных 255 В за примерно 2 сек. и всплеск тока якоря не превышает допустимого его значения в 12 А.

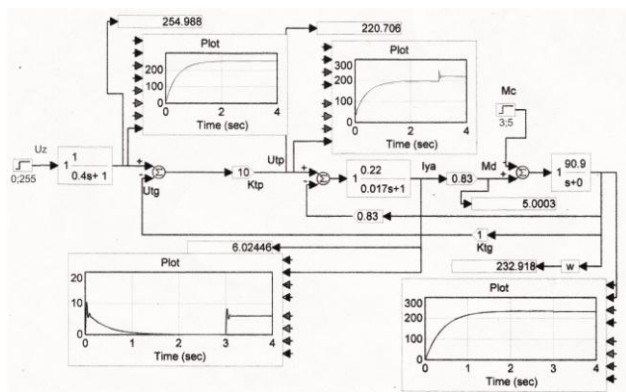


Рис. 6 – Результат моделирования двигателя с обратной связью по скорости и постепенным нагружением его U_z через апериодическое звено первого порядка

Возмущающее воздействие M_c подается через 3 сек. и при его максимально допустимом значении в 5Н·м двигатель практически не теряет угловую скорость, что хорошо видно из правого нижнего графика.

Известно, [4] что регулирование частоты вращения двигателя ω постоянного тока осуществляется бесступенчато при изменении напряжения подаваемого на обмотку якоря в сторону уменьшения его от номинального значения 220 В.

Напряжение, подаваемое на обмотку якоря это выходное напряжение тиристорного преобразователя U_{tp} . Согласно рис. 6 оно равно номинальному, в то время как напряжение на входе в двигатель U_z с учетом всех дополнительных устройств равно 255 В. При $U_z = 255$ В частота вращения двигателя согласно рис. 6, т.е. максимальное ее значение, равно 232.9 рад/с. Таким образом, управление частотой вращения двигателя осуществляется уменьшением напряжения U_z от 255 В в сторону уменьшения.

Поэтому необходимо знать связь $\omega_1(U_z)$, т.е. статическую механическую характеристику двигателя с учетом всех дополнительных устройств обратной связи по скорости. Эта связь в динамике зависит от M_c , однако, влияние M_c на ω невелико, что установлено выше, поэтому приближенную зависимость $\omega_1(U_z)$ получим при среднем значении $M_c = 2,5$ Н·м.

Пользуясь блок – схемой модели рис. 6 можно для $M_c = 2,5$ Н·м перебирая значения U_z от его максимального допустимого значения обеспечивающее напряжение подаваемое на якорь двигателя равное 220 В в сторону уменьшения, получить податливость механической характеристики

$\beta = \frac{\omega}{U_z}$ или $U_z = \beta \cdot \omega$. Значение β для двигателя 2ПД100МУХЛ4 равно 1,12.

При этом максимальное значение $\omega = 248$ рад/с.

Из модели двигателя записанной через передаточные функции ее элементов может быть получено первое уравнение системы (1), т.е. уравнение якоря с учетом обратной связи по скорости двигателя, для этого от подаваемого на якорь

напряжения U в установившемся режиме работы надо отнять U_{tg} и умножить полученный результат на K_{tp} . В результате получим:

$$L_{\text{я}} \frac{dJ_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} J_{\text{я}} + C_e \omega = (U_z - U_{tg}) \cdot K_{tp} \cdot \quad (16)$$

Второе уравнение системы (1) остается неизменным. Таким образом, получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка, т.е. получаем возможность представить модель двигателя в пространстве состояний с учетом обратной связи по скорости и ограничениями на ток якоря в установившемся режиме круглого наружного врезного шлифования.

Владея разработанной моделью двигателя можно выполнить анализ крутильных колебаний привода вращения заготовки без упрощения модели двигателя как это обычно делается [7].

Выводы. Разработана модель двигателя постоянного тока 2ПД100МУХЛ4 с независимым возбуждением в виде структурной схемы с передаточными функциями и связями между ними. Эта модель позволила получить визуальное наблюдение за всеми сигналами модели и решить поставленные задачи:

- обеспечить величину всплесков тока якоря в переходных режимах не выше допустимого из условия его нагрева;
- установить максимальное значение момента сопротивления;
- получить зависимость входного напряжения U_z от требуемой (настраиваемой) частоты ω вращения ротора с учетом обратной связи по скорости.

Список литературы:

1. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – Москва : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
2. Левин А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков. – Москва : Машиностроение, 1978. – 184 с.
3. Дьяконов В.П. VisSim + Mathcad + MatLAB. Визуальное математическое моделирование. – Москва : Солон – Пресс, 2004. – 384 с.
4. Справочник по электрическим машинам. В 2 томах. Под общей редакцией Копылова И.П., Клокова Б.К. Том 1, Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 258 с.
5. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости. – Москва : Наука, 1981. – 303 с.
6. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – Київ : УкрНДУТАТ, 2003. – 283 с.
7. Ривин Е. И. Динамика приводов станков. – Москва : Машиностроение, 1966. – 204 с.

References (transliterated)

1. Fillips Ch., Harbor R. Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'ju [Feedback control systems] – Moscow: Laboratorija bazovyh znaniy, 2001. – 616 p.
2. Levin A.I. Matematicheskoe modelirovanie v issledovaniyah i proektirovanii stankov [Mathematical simulation in research and machine tools projection] – Moscow: Mechanical Engineering, 1978. – 184 p.

3. D'jakonov V. P. VisSim + Mathcad + MatLAB. *Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie* [VisSim + Mathcad + MatLAB. Visual mathematical simulation] – Moscow: Solon – Press, 2004. – 384 p.
4. *Spravochnik po jelektricheskim mashinam* [Reference book in electrical] V 2 tomah. Pod obshhej redakciej Kopylova I.P., Klokova B.K. Tom 1, Moscow: Jenergoatomizdat, 1988. – 258 p.
5. Krasnov M.L., Kiselev A.I., Makarenko G.I. *Funkcii kompleksnogo peremennogo. Operacionnoe ischislenie. Teorija ustojchivosti* [The functions of a complex variable. Operational calculation. Theory of sustainability.] – Moscow: Nauka Publ, 1981. – 303 p.
6. Petrakov Yu.V. *Avtomatyzhne upravlinnya procesamy`obrobky` materialiv rizannyam* [Automatic control process of material cutting] – Kiyev : UkrNDUTAT, 2003. – 283 p.
7. Rivin E. I. *Dinamika privodov stankov* [Dynamic of machine tools] – Moscow: Mechanical Engineering, 1966. – 204 p.

Поступила (received) 05.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сизий Юрій Анатолійович (Сизый Юрий Анатольевич, Sisy Jury Anatolievich) – доктор технічних наук, професор, Державне Підприємство «Український Науково-Технічний Центр Металургійної Промисловості «Енергосталь», м. Харків; тел.: +38-066-788-24-41; e-mail: sisy.jurys@yandex.ua;

Сталінський Дмитро Віталійович (Сталинский Дмитрий Витальевич, Stalinsky Dmitry Vitalievich) – доктор технічних наук, професор, Державне Підприємство «Український Науково-Технічний Центр Металургійної Промисловості «Енергосталь», м. Харків; тел.: +38 (057) 702-17-31; e-mail: energostal@energostal.kharkov.ua;

Чайка Едуард Григорович (Чайка Едуард Григорьевич, Chayka Eduard Grigorievich) – кандидат технічних наук, доцент каф. АСУ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-095-134-61-22; e-mail: e-chyka@yandex.ua;

Ушаков Олександр Миколайович (Ушаков Александр Николаевич, Uschakov Alexander Nykolaevich) – кандидат технічних наук, доцент каф. ТМС МІТ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-097-882-22-11; e-mail: parom38@yandex.ua;

Щербініна Тетяна Євгенівна (Щербинина Татьяна Евгеньевна, Sherbinina Tatyana Evgenievna) – кандидат фіз.-мат наук, доцент прикладної математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-050-323-37-84; e-mail: kurpa@kpi.kharkov.ua

КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В., ЮРЬЕВА М.В. СЮЙ ЦЮАНЬЯО, ФУ ХУН

ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНИСТОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Построение информационной модели технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес является одним из этапов управления технологической структурой и параметрами автоматизации проектирования технологического процесса. С учетом принципов классификации информации автоматизируемый процесс зубообработки рассматривается как объект управления, состоящий из ряда технологических объектов: исходный материал (вход объекта управления); окружающая среда (условия протекания процесса); зубчатое колесо (выход объекта управления, количественная и качественная характеристика поверхностного слоя); модуль обработки с системой управления и технологической оснасткой (собственно объект управления). Задача оптимального управления зубообработкой формулируется как задача выбора формообразования, который обеспечивает максимальную производительность с обеспечением качественного поверхностного слоя закаленных зубчатых колес при заданной точности с учетом показателя себестоимости.

Ключевые слова: Информационная модель, технологический процесс, параметры, зубообработка, автоматизации проектирования, оптимальное управление, качество поверхностного слоя

КЛОЧКО А.А., БАБЕНКО М.В., ЮРЬЕВА М.В., СЮЙ ЦЮАНЬЯО, ФУ ХУН

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЯСТОСТІ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС

Побудова інформаційної моделі технологічних процесів зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є одним з етапів управління технологічною структурою і параметрами автоматизації проектування технологічного процесу. З урахуванням принципів класифікації інформації автоматизується процес зубообробки розглядається як об'єкт управління, що складається з ряду технологічних об'єктів: вихідний матеріал (вхід об'єкта управління); навколишнє середовище (умови протікання процесу); зубчасте колесо (вихід об'єкта управління, кількісна та якісна характеристика поверхневого шару); модуль обробки з системою управління та технологічним оснащенням (власне об'єкт управління). Завдання оптимального управління зубообробки формулюється як задача вибору формоутворення, який забезпечує максимальну продуктивність із забезпеченням якісного поверхневого шару загартованих зубчастих коліс при заданій точності з урахуванням показника собівартості.

Ключові слова: Інформаційна модель, технологічний процес, параметри, зубообробки, автоматизації проектування, оптимальне управління, якість поверхневого шару.

KLOCHKO A.A., BABENKO M.V., YURIEVA M.V., XU QUANIAO, FU HONG

INFLUENCE OF WAVE PARAMETERS ON OPERATIONAL PROPERTIES OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS

The construction of an information model of the technological processes of tooth treatment of hardened large-modular gears is one of the stages of controlling the technological structure and parameters of the automation of the design of the technological process. Taking into account the principles of information classification, the automated process of gear processing is considered as a control object, consisting of a number of technological objects: source material (input of the control object); environment (process conditions); gear wheel (control object output, quantitative and qualitative characteristics of the surface layer); processing module with a control system and technological equipment (the actual control object). The task of optimal control of tooth processing is formulated as the task of choosing a shaping that provides maximum performance while ensuring a high-quality surface layer of hardened gears with a given accuracy, taking into account the cost indicator.

Keywords: information model, technological process, parameters, gear processing, design automation, optimal control, surface layer quality

1. Введение. Эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес в значительной мере зависят от волнистости их поверхностей. Основными причинами возникновения волнистости являются динамические процессы, протекающие при зубообработке цилиндрических зубчатых колес на зубообрабатывающих станках и вызывающие появление автоколебаний, вынужденных колебаний системы ДТСС. В общем случае на образование волнистости поверхностей цилиндрических зубчатых колес при зубообработке оказывают влияние следующие факторы: исходное состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки; точность базирования и закрепления заготовки зубчатого колеса и фрезы; геометрия фрезы и кинематика перемещения фрезы и обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса.

2. Основная часть. Взаимосвязи от методов и

режимов зубообработки степень влияния перечисленных факторов на образование волнистости будет различной [1, 4, 16, 17]. Таким образом, средняя высота волнистости, образуемой на эвольвентной поверхности цилиндрического зубчатого колеса при зубообработке, складывается из всех перечисленных составляющих в соответствии с правилами суммирования случайных величин:

$$W_z = 1,2\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}. \quad (1)$$

Составляющая высоты волнистости H_1 , обусловленная исходным состоянием поверхностного слоя обрабатываемой заготовки при встречном зубофрезеровании, исходя из разности сил, действующих на инструмент, вызываемой разнородностью состояния поверхностного слоя заготовки и динамикой процесса, как и для шероховатости, может быть определена по формуле:

$$H_1 = \frac{c_{\gamma} s_{\gamma} \rho v^2 P [H_{B_{max}}^n t^{x_p} - H_{B_{min}}^n (t - W_{2_{исх}} - R_{2_{исх}})^{x_p}]}{H_{B_{cp}}^n j_{cp} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T h^2 \lambda^2}}, \quad (2)$$

где $W_{исх}$ – исходная высота волн

© А.А. Клочко, М.В. Бабенко, М.В. Юрьева, Сюй Цюаньяо, Фу Хун, 2020

При скоростном зубофрезеровании дисперсия исходного состояния поверхностного слоя приводит к динамическому изменению радиальной силы, а следовательно, и к вынужденным колебаниям фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки [2, 5, 14].

При зубообработке колебания фрезы относительно обрабатываемой поверхности заготовки представляют собой сложение радиальных, осевых и касательных перемещений (рис. 1). Колебания фрезы могут быть представлены в виде системы с тремя степенями свободы (поступательное движение вдоль осей x , y и z).

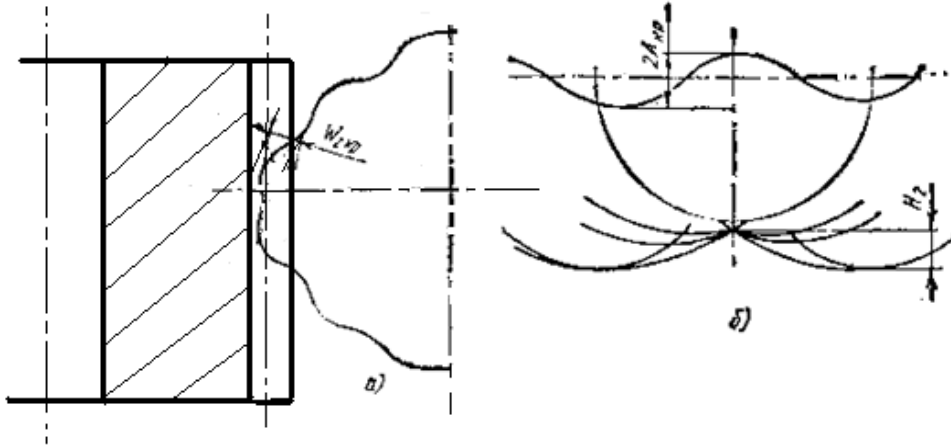


Рис. 1 – Исходная схема для расчета составляющей H_2 при скоростном зубофрезеровании от вынужденных колебаний фрезы (а) и от автоколебаний фрезы (б)

Причем на высоту образующихся волн первостепенное влияние будут оказывать колебания вдоль осей y и z . Составляющая H_2 , обусловленная этими колебаниями:

$$H_2 = 2C_0 \left\{ 1 + \cos \left[(n-1) \frac{180}{n} \right] \right\}, \quad (3)$$

где C_0 – амплитуда главного колебания вдоль оси y , определяемая из равенства

$$C_0 = H_1/2. \quad (4)$$

При скоростном зубофрезеровании радиальное биение фрезы вызывают колебание радиальной силы, приводящей к вынужденным колебаниям оси фрезы (рис. 1). Составляющая от этих колебаний:

$$H_2 = A_{\text{фр}} \left\{ 1 - \cos \left[13,2 \frac{v_D}{t_n} \sqrt{\frac{1}{A_{\text{кр}}} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{d} \right)} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $A_{\text{фр}}$ – амплитуда биения оси фрезы; f_n – частота биения.

Изменение радиальной силы резания при скоростном зубофрезеровании приводит к неравномерному износу фрезы и появлению волнистости на обрабатываемой поверхности профиля зубчатого колеса [3, 6 10, 15].

При ППД обработке составляющая волнистости H_2 от биения рабочей поверхности ролика и ее волнистости может быть описана через изменение рабочего усилия ΔP :

$$H_2 = R_p \text{ исх} \left\{ \frac{150 \Delta P K_{\text{фр}} (1+f^2)^{0,5}}{\pi R t_{\text{м исх}} \sigma_T \left[\frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}} (h_{\text{кнц}} - h_{\text{уп}}) - 2h_{\text{уп}}}{a_{\text{пл}}} \right]} \right\}^{\frac{1}{v_{\text{исх}}}}, \quad (6)$$

Принимая распределение составляющих приращения усилия от волнистости и биения рабочего ролика по закону Гаусса, имеем

$$\Delta P = 1,2 j_{\text{ДТСС}} \sqrt{W_{\text{зр}}^2 + \Delta_p^2}, \quad (7)$$

где Δ_p – биение поверхности ролика.

При скоростном зубофрезеровании форма инструмента и кинематика его перемещения влияют на волнистость через составляющие H_1 и H_2 .

Составляющая H_3 особенно ярко проявляется при прерывистом скоростном зубофрезеровании в виде так называемой кинематической волнистости, которая:

$$H_3 = \frac{D(1 - \cos \delta)}{2 \cos \delta}, \quad (8)$$

$$\text{где } \delta = \frac{180 l_{\text{ен}} V_D}{\pi V_{\text{кр}} D}, \quad (9)$$

$l_{\text{ен}}$ – окружной шаг скоростной фрезы.

При ППД обработке H_3 определяется толщиной слоя металла, приводящего к образованию наплыва в направлении движения деформирующего элемента, обусловленной кинематикой перемещения и геометрией инструмента.

В процессе обработки перед рабочим роликом движется наплыв обрабатываемого материала [7, 9, 13]. Высота наплыва постепенно увеличивается, приводя к увеличению пл. ельно, к их упругому отжатию. При достижении критической величины наплыва ролик ошадит контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью, а следовательно проскальзывает его, вызывая образование составляющей H_3 , и под действием радиальной силы занимает свое исходное положение. Затем этот процесс повторяется. Величина образующейся волнистости при этом может быть рассчитана по формуле

$$H_3 = h_{киц} - r \left[1 - \frac{f P_x + P_y}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)(1 + f^2)}} \right], \quad (10)$$

где P_x – осевая сила, действующая на ролик.

Подставляя (2) и (3) в (1) и произведя математические преобразования, получим уравнение для определения средней высоты волн при зубофрезеровании:

$$W_z = \frac{1,2 c_y s^{y \frac{2}{3}} p_z (HB_{max}^n t^{xy} - HB_{min}^n (t - W_{2 \text{ икс}} - R_{зискс})^{xy})}{HB_{ср \text{ снид}}^n \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}} \times \sqrt{1 + \left\{1 + \cos \left[(n-1) \frac{180}{n} \right] \right\}^2}. \quad (11)$$

Так как n на два порядка больше 1, (11) примет вид:

$$W_z = \frac{1,2 c_y s^{y \frac{2}{3}} p_z (HB_{max}^n t^{xy} - HB_{min}^n (t - W_{2 \text{ икс}} - R_{зискс})^{xy})}{HB_{ср \text{ снид}}^n \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h \lambda^2}}. \quad (12)$$

Высота сглаживания профиля волнистости при зубофрезеровании для нормального закона распределения определяется из равенства $W_p \approx 0,5 W_z$. (13)

Аналогичным образом получено уравнение для расчета высоты волн при ППД обработке:

$$W_z = 1,2 \sqrt{\left\{ \frac{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]}{j_{сид} \pi B E_1 E_2} \times \ln \frac{2\pi E_1 E_2 (D+d) B}{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + \frac{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]}{j_{сид} \pi B E_1 E_2} \times \ln \frac{2\pi E_1 E_2 (D+d) B}{\Delta P_y [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]}} \right\}^2 + \left\{ A_{кр} \left[1 - \cos \left(13,2 \frac{v_D}{f_n} \sqrt{\frac{1}{A_{кр}}} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \right) \right] \right\}^2 + \left(6 c_{py} W_{z_{кр}}^{xpy} v_y D^{py} v_{кр}^{zpy} \sum k_1 \right)^2 - \left[\frac{D \left(1 - \cos \frac{180 i_B D v_D}{\pi v_{кр} D} \right)}{2 \cos \frac{180 i_B D v_D}{\pi v_{кр} D}} \right]^2}. \quad (14)$$

Подставляя (11), (12) и (13) в (14), получим общее уравнение для расчета высоты волн при ППД обработке: При $R_{рискс} = 3R_{аискс}$, $h_{кин} < \rho$ и $f = 0,1$ (14) примет вид

$$W_z = 1,2 \left\{ \left[W_{зискс} - \left(\frac{9 \rho R_{аискс}^2}{\pi R_{пф} HB} \right)^{1/3} \right] + \left[\frac{27 j_{дтос} (W_{zp}^2 + \Delta_p^2)^{0,5} R_{аискс}^2}{\pi r c' \sigma_T \frac{180 - \arccos \frac{a_{пл}}{a_{пл}} (h_{кин} - h_{уп}) - 2 h_{уп}}}{\alpha_{пл}} \right]^2 + h_{кин}^2 \right\}^{0,5}. \quad (15)$$

Высота сглаживания профиля волнистости при ППД определяется из равенства

$$W_p = 0,4 W_z. \quad (16)$$

Экспериментальная проверка полученных теоретических уравнений была проведена при зубофрезеровании твердосплавными фрезами [8, 11, 12], при скоростном зубофрезеровании и накатывании коническими роликами (ППД) цилиндрических зубчатых колес модулем $m = 16 \text{ мм}$ из стали 40X на зубоизмерительной машине Mahr (Германия) MarGear GMX 275 (Рис. 2). Применение зубоизмерительной машины MarGear GMX 275 обеспечивает оптимальное качество контроля и представления результатов проверки параметров зубчатого венца, в т.ч. параметров волнистости. Получаемые результаты дают полную информацию о причинах возникновения

погрешностей и позволяют использовать эту информацию для соответствующей корректировки технологии изготовления детали. К недостаткам данного метода проверки следует отнести длительный цикл измерения и сложность в применении зубоизмерительной машины непосредственно около станка — являясь метрологическим средством очень высокой точности, машина требует установки в специально подготовленное помещение.

Принцип работы зубоизмерительной машины и традиционных приборов для контроля эвольвенты, направления зуба и шага зубьев во многом схож. В процессе измерения шуп измерительной машины

сканирует боковую поверхность зуба по профилю (рис. 3) и последовательно касается всех боковых сторон зубьев. В результате этих основных проверок определяется погрешность профиля, волнистость эвольвентной поверхности зубьев, отклонения шагов и погрешность радиального биения.

Получаемый результат аналогичен результату проверки на эвольвентомере. Если профиль зуба представляет собой правильную эвольвенту с заданными параметрами, то результатом измерения в графическом представлении будет прямая.

Проверка профиля и линии зуба проводится, как правило, на 3–4 зубьях. Это делается с целью сокращения времени измерения. При этом информативность такого неполного измерения вполне достаточна, так как выявляет все погрешности зубчатого венца, изготовленного методом обката.

На любом выбранном зубе может быть проведена проверка профиля и линии зуба в нескольких сечениях. В этом случае результатом измерения является топография поверхности зуба. Во многих случаях используется модификация поверхности зуба по профилю и направлению, имеющая целью оптимизацию технологии изготовления колес (например, модификация зуба при черновой обработке с целью компенсации деформаций при термической обработке) или улучшение параметров готового изделия (оптимизация пятна контакта в паре зубчатых колес). Возможность оценки топографии зуба дает возможность наглядно оценить модификацию поверхности зуба. Кроме того, при применении дополнительного программного обеспечения для зубоизмерительных машин существует возможность моделирования и оценки контакта измеренного зуба либо в зацеплении с идеальным колесом, либо в зацеплении с другим измеренным колесом.

Получаемые при измерении детали протоколы дают широкие возможности для оценки причин возникновения погрешностей. Для этого существуют определенные методики.



Рис. 2 – Зубоизмерительная машина Mahr (Германия) MarGear GMX 275 для контроля отклонения высоты волн W_z эвольвентной поверхности зубьев от жесткости динамической технологической станочной системы

Например, при получении диаграммы профиля, можно определить пять основных причин возникновения погрешности:

- биение фрезы на оправке (может быть вызвано плохой фрезой, поврежденной оправкой или загрязнением оправки при монтаже);
- неправильная заточка фрезы (фреза была переточена с радиальным биением из-за установки с перекосом на оправку или оправки на заточной станок);
- слабо закрепленная или изношенная оправка в противоопоре станка;
- слишком большой люфт шпинделя фрезы фрезерного станка;
- слишком большой люфт стола фрезерного станка.

Эти зубоизмерительные машины обладают уникальной встроенной системой термокомпенсации, что обеспечивает точность измерения даже при колебаниях температуры в помещении. Например, при колебании температуры в помещении на 8 градусов разброс результатов измерения составляет всего 0,6 микрона. Конструктивно зубоизмерительные машины Mahr сделаны на базе кругломеров высокой точности, при этом все функции кругломера сохранены в базовом программном обеспечении. На практике это означает, что, приобретая одну машину Mahr, заказчик фактически приобретает два метрологических средства — зубоизмерительную машину и кругломер. Важнейшим элементом машины является сканирующая головка. Головка машины Mahr представляет собой миниатюрную копию трехкоординатной измерительной машины и обеспечивает измерение с постоянным измерительным усилием всегда по нормали к измеряемой поверхности.



Рис. 3 – Сканирование волнистости боковой поверхности зуба по профилю на зубоизмерительной машине MarGear GMX 275

При наличии дополнительного программного обеспечения можно реализовать дополнительные функции измерения цилиндрических колес: сравнение параметров колес до и после термической обработки (результат представляется в графическом виде, что позволяет легко и быстро определить деформации

детали при термической обработке); измерение «колес» с определением их основных параметров (для тех случаев, когда имеется колесо, у которого можно только измерить наружный диаметр и сосчитать число зубьев неизвестных, с определением остальных конструктивных размеров); измерять колеса после операции зубофрезерования с исключением влияния следа от подачи; измерять форму и размеры тел вращения (т. е. деталей с зубчатыми венцами), т. е. использовать зубоизмерительную машину как кругломер и координатно-измерительную машину.

Анализ полученных результатов исследований показывает, что основное влияние на волнистость при скоростном зубофрезеровании и накатывании оказывают жесткость технологической системы, скорость, подача, коэффициент формообразования поверхностного слоя.

Выводы. Как и для шероховатости, явление технологической наследственности особенно ярко проявляется при ППД: высота образующейся волнистости зависит от ее исходного значения; величины исходной шероховатости и физико-механических свойств обрабатываемого зубчатого колеса. Для уменьшения волнистости при накатывании необходимо обеспечить равномерность пластических деформаций в зоне контакта и уменьшить величину внедрения конического ролика в обрабатываемую поверхность. Это достигается применением инструмента с каплевидным контактом.

Список литературы:

1. Ямпольский, Л.С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – К.: Техника, 1988. – 175 с.
2. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – С-Пб.: Профессия, 2007. – 832 с.
3. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А. Ключко [и др.]; Науч. Ред.: А.А. Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с., ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.
4. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Сулов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.
5. Андiлахай О.О., Ключко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Старченко Е.П. Технологiчнi засоби обробки крупногабаритних евольвентних шлицьових з'єднань з модифiкацiєю зуборiзного iнструменту: Машинобудування i зварювальне виробництво / Наука та виробництво : мiжвузiвський тематичний збiрник наукових праць. – Мариуполь : ДВУЗ «ПДТУ», 2019. – Вип. 19. – С.50–63.
6. Пермяков А.А., Ключко А.А., Набока Е.В., Перминов Е.В., Новиков Ф.В. Технологические предпосылки снижения динамических нагрузок и шума за счёт создания и прогнозирования априорных передаточных чисел с формированием оптимального поверхностного слоя зубчатых передач // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсе - и энергосбережении: Материалы международной научно-практической конференции. 16–18 мая 2019, г. Харьков. – Одеса.: ОНПУ, 2019. – С. 134–138.
7. Новиков Ф. В., Ключко А. А., Камчатна-Степанова Е. В., Старченко Е. П. Анализ перспективных технологических схем зубофрезерования крупномодульных шевронных закаленных колес // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсе - и энергосбережении: Материалы международной научно-практической конференции. 16–18 мая 2019, г. Харьков. – Одеса.: ОНПУ, 2019. – С. 124–129.
8. Беловол А.В., Гасанов М.И., Ключко О.О., Набока О.В., Скоркин А.О., Шелковой О.М. Imitaцiйне моделювання в задачах машинобудiвного виробництва: навч. пос. / за ред. О.М.Шелкового. □ Харкiв: НТУ «ХПИ», 2019. □ 500 с. ISBN 978-617-05-0284-1.
9. Ковалев В.Д., Клименко С.А., Антонюк В.С., Васильченко Я.В., Ключко А.А., Рябенко С.В., Волошин О.И., Статкевич О.В., Иванов С.О. Створення та впровадження iнновацiйних технологiй виготовлення крупногабаритних редукторiв важкого машинобудування. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матерiали Мiжнародної науково-технiчної конференцiї 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 5 – 6. ISBN 978-966-379-853-0.
10. Заковортний О.Ю., Ключко О.О., Старченко О.П., Камчатна-Степанова К.В. Анциферова О.О. Пiдвищення точностi, якостi та продуктивностi обробки крупногабаритних евольвентних шлицьових поверхонь. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матерiали Мiжнародної науково-технiчної конференцiї 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.
11. Ключко О. О.; Иванченко В. В. Мехатронне пристосування для обробки зубчастих колiс методом обкочування на унiверсальних фрезерних верстатах. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матерiали Мiжнародної науково-технiчної конференцiї 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 52. ISBN 978-966-379-853-0.
12. Guo, S Mao, Y. Yang, Y. Kuang, Optimization of cutter blade profile for face-hobbed spiral bevel gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85 (2016) 209–216.
13. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, K. Yuan, Z. Geng, Error-sensitivity analysis of ease-off based for spiral bevel gears using a semi-analytical loaded contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 230 (7) (2016) 147–161.
14. M. Wasif, Z.C. Chen, S.M. Hasan, Determination of cutter-head geometry for the face-milling of hypoid gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 86 (9) (2016) 3081–3090.
15. P. Wang, Y. Zhang, M. Wan, Global synthesis for face milled spiral bevel gears with zero transmission errors, ASME J. Mech. Des. 138 (2016) 1–9 Art. no. 033302.
16. N. Park, A generalized hypoid gear synthesized with common crown rack positioned between pinion and gear blanks, J. Mech. Des. 139 (2017) 085001–1–9.
17. M. Kolivand, G.K Steyer, M.F. Stroh, A study on hypoid gears NVH robustness, SAE Int. J. Veh. Dyn. Stab. NVH 1 (2) (2017) 417–427.

References (transliterated)

18. Yampol'skij, L.S. Optimizacziya tekhnologicheskikh proczessov v gibkikh proizvodstvenny'kh sistemakh / L. S. Yampol'skij, M. N. Polishhuk. – K.: Tekhnika, 1988. – 175 s.
19. Tekhnologiya proizvodstva i metody` metody` obespecheniya kachestva zubchaty'kh koles i peredach / Pod obshh. red. V. E. Starzhinskogo, M. M Kane. – S-Pb. : Professiya, 2007. – 832 s.

20. Tekhnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh koles [Tekst] / N.V. Kravczov, Yu.V. Timofeev, A.A.Klochko [i dr.]; Nauch. Red., A.A.Permiyakov; VolGTU – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 254 s., il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev), ISBN 978-59903090-6-7.
21. Kane M.M. Upravlenie kachestvom produkcii mashinostroeniya / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gorlenko i dr. pod obshh. red. d.t.n. M. M. Kane. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 416 s.
22. Andilakhaj O.O., Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Starchenko Ye.P. Tekhnologichni zasobi obrobki krupnogabaritnikh evolventnikh shli'cz'ovikh z'yednan' z modifi'kaczi'yey zubori'znogo i'nstrumentu: Mashinobuduvannya i zvaryval'ne virobnicztvo / Nauka ta virobnicztvo : mi'zhvuzi'vs'kij tematichnij zbi'rnik naukovikh prac'. – Mariupol': DVUZ «PDTU», 2019. – Vip. 19. – S.50–63.
23. Permyakov A.A., Klochko A.A., Naboka E.V., Perminov E.V., Novikov F.V. Tekhnologicheskie predposylki snizheniya dinamicheskikh nagruzok i shuma za schyot sozdaniya i prognozirovaniya apriornykh peredatochnykh chisel s formirovaniem optimal'nogo poverkhnostnogo sloya zubchatykh peredach // Novy'e i netradiczionny'e tekhnologii v resurso - i e'nergoberezhennii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii. 16–18 maya 2019, g.Khar'kov. – Odesa.: ONPU, 2019. – S. 134–138.
24. Novikov F. V., Klochko A. A., Kamchatnaya-Stepanova E. V., Starchenko E. P. Analiz perspektivnykh tekhnologicheskikh skhem zubofrezerovaniya krupnomodul'nykh shevronnykh zakalennykh koles // Novy'e i netradiczionny'e tekhnologii v resurso - i e'nergoberezhennii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii. 16–18 maya 2019, g.Khar'kov. – Odesa.: ONPU, 2019. – S. 124–129.
25. Belovol A.V., Gasaov M.I., Klochko O.O., Naboka O.V., Skorkin A.O., Shelkovo O.M. I'mitaczi'jne modelyuvannya v zadachakh mashinobudi'vnogo virobnicztva: navch. pos. / za red. O.M.Shelkovogo. □ Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. □ 500 s. ISBN 978-617-05-0284-1.
26. Kovalev V.D., Klimenko S.A., Antonyuk V.S., Vasil'chenko Ya.V., Klochko A.A., Ryabchenko S.V., Voloshin O.I., Statkevich O.V., Ivanov S.O. Stvorenniya ta vprovadzhenniya
- i'nnovaczi'jnikh tekhnologi'j vigotovlenniya krupnogabaritnikh reduktori'v vazhkogo mashinobuduvannya. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 5 – 6. ISBN 978-966-379-853-0.
27. Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O., Starchenko O.P., Kamchatna-Stepanova K.V. Ancziferova O.O. Pi'dvishhenniya tochnosti, yakosti ta produktivnosti obrobki krupnogabaritnikh evolventnikh shli'cz'ovikh poverkhon'. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.
28. Klochko O. O.; Ivanchenko V. V. Mekhatronne pristosuвання для обробки зубчастих коліс методом обкочування на універсальних фрезерних верстатах. Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi 04 – 07 lipnya 2019 roku / Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 52. ISBN 978-966-379-853-0.
29. Guo, S Mao, Y. Yang, Y. Kuang, Optimization of cutter blade profile for face-hobbed spiral bevel gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85 (2016) 209–216.
30. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, K. Yuan, Z. Geng, Error-sensitivity analysis of ease-off based for spiral bevel gears using a semi-analytical loaded contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 230 (7) (2016) 147–161.
31. M. Wasif, Z.C. Chen, S.M. Hasan, Determination of cutter-head geometry for the face-milling of hypoid gears, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 86 (9) (2016) 3081–3090.
32. P. Wang, Y. Zhang, M. Wan, Global synthesis for face milled spiral bevel gears with zero transmission errors, ASME J. Mech. Des. 138 (2016) 1–9 Art. no. 033302.
33. N. Park, A generalized hypoid gear synthesized with common crown rack positioned between pinion and gear blanks, J. Mech. Des. 139 (2017) 085001–1–9.
34. M. Kolivand, G.K Steyer, M.F. Stroh, A study on hypoid gears NVH robustness, SAE Int. J. Veh. Dyn. Stab. NVH 1 (2) (2017) 417–427

. Поступила (received) 10.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Бабенко Максим Віталійович (Babenko Maxim Vitalievich) – студент, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066) 762-41-70; e-mail: babenko29052000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3981-6408

Юр'єва Марія Віталіївна (Yuryeva Maria Vitalievna) – студентка, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (066) 052-65-61; e-mail: maureva16@gmail.com.

Сюй Цюаньао (Xui Quaniao) – ведучий спеціаліст Харбинської зони високотехнологічного промислового розвитку, науково-технічних інновацій і підприємництва м. Харбін; тел.: +86 18246070961; e-mail: huayuedongfang_fh@163.com

Фу Хун (Fu Hong) – ведучий спеціаліст Харбинської зони високотехнологічного промислового розвитку, науково-технічних інновацій і підприємництва м. Харбін; тел.: +86 18246070961; e-mail: huayuedongfang_fh@163.com

РУЗМЕТОВ А.Р., УШАКОВ О.М.

ВИЯВЛЕННЯ СТРУКТУРИ АНАЛІТИЧНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ВІД ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Підвищити рівень оптимізації завантаження технологічного комплексу з універсальним, мало автоматизованим обладнанням можна за рахунок одержання більш точної диференційованої інформації про працездатність робітника, що його обслуговує. Існуюча нормативна база поверхово враховує падіння працездатності через середньостатистичні показники і дає досить великий розкид значень: 15 – 30 %. Для підвищення точності контролю динаміки падіння працездатності основного робітника авторами запропонований метод диференційованого обліку груп факторів, які впливають на виконання кожного робочого руху, включеного до складу відповідного технологічного переходу. В ході виконаних досліджень розглядалася група факторів, що впливає на ріст інформаційної напруги робітника, що виражається в погіршенні уваги і швидкості рішення елементарних виробничих завдань. Підвищення точності прогнозування часових рамок проведення внутріопераційних допоміжних процесів, повинне забезпечуватися методикою, що коректно враховує зв'язок динаміки падіння працездатності робітника з ростом інформаційної напруги. Це дозволить поліпшити склад допоміжного оснащення і підвищити рівень оптимізації планування завантаження основного обладнання при врахуванні можливості багатостаночного обслуговування.

Ключові слова: технологічний комплекс, оснащення, обладнання, пристосування, автоматичний робочий хід, працездатність, технологічний прийом, інформаційна напруга.

РУЗМЕТОВ А.Р., УШАКОВ А.Н.

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ИНФОРМАЦИОННОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Повысить уровень оптимизации загрузки технологического комплекса с универсальным, мало автоматизированным оборудованием можно за счет получения более точной дифференцированной информации о трудоспособности рабочего, который его обслуживает. Существующая нормативная база поверхностно учитывает падение трудоспособности через среднестатистические показатели и дает довольно большой разброс значений: 15 – 30 %. Для повышения точности контроля динамики падения трудоспособности основного рабочего авторами предложен метод дифференцированного учета групп факторов, которые влияют на выполнение каждого рабочего движения, включенного в состав соответствующего технологического перехода. В ходе выполненных исследований рассматривалась группа факторов, которая влияет на рост информационного напряжения рабочего, который выражается в ухудшении внимания и скорости решения элементарных производственных задач. Повышение точности прогнозирования временных рамок проведения внутриоперационных вспомогательных процессов, должно обеспечиваться методикой, которая корректно учитывает связь динамики падения трудоспособности рабочего с ростом информационного напряжения. Это позволит улучшить состав вспомогательного оснащения и повысить уровень оптимизации планирования загрузки основного оборудования при учете возможности многостаночного обслуживания.

Ключевые слова: технологический комплекс, оснащение, оборудование, приспособление, автоматический рабочий ход, трудоспособность, технологический прием, информационное напряжение.

RUZMETOV A.R., USHAKOV A.N.

DETERMINATION OF THE ANALYTICAL DEPENDENCE STRUCTURE OF INFORMATION TENSITY COEFFICIENT FROM TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT PARAMETERS

To increase the level of optimization of the loading a technological complex with universal, little automated equipment possible by obtaining more accurate differentiated information on the working capacity of the worker who serves him. The existing normative framework superficially takes into account the decline in working capacity through average statistic indicators and gives a rather large range of values: 15-30%. To increase the accuracy of control the dynamics of the fall in the working capacity of the main worker the authors propose a method of differentiated accounting of factors group of that affect the performance of each labor movement. In the course of the research was considered a group of factors that affects the growth of information tensity of the worker, which is expressed in the worsening of attention and velocities of the decision of the elementary production problems. The increase accuracy of forecasting the time frame for inside-operation supporting processes, should be provided by the methodology, which correctly takes into account the relationship between the dynamics of the of the fall in the working capacity of the worker with the growth of information tensity. This will improve the composition of auxiliary equipment and increase the level of optimization the planning loading of the main equipment, taking into account the possibility of multi-machine service.

Keywords: technological complex, equipping, equipment, fixing device, automatic worker move, working capacity, technological technique, information tensity.

1. Вступ. Планування завантаження основного обладнання неможливо робити без параметрів трудомісткості кожної розглянутої операції. Вибір найбільш ефективної і надійної структури допоміжного процесу дозволить оптимізувати склад допоміжного оснащення і контролювати рівень трудомісткості допоміжного процесу. Це буде

сприяти плануванню завантаження основного обладнання при врахуванні можливості багатостаночного обслуговування.

Тут у понятті "ефективність" вкладений зв'язок із трудомісткістю і можливістю паралельного запуску декількох технологічних операцій (при наявності перекриваємого допоміжного часу). У понятті

"надійної структури" мається на увазі коректне прогнозування часових рамок проведення внутрішньо операційних допоміжних процесів у зв'язку з динамікою падіння працездатності робітника. Коректність прогнозування складається в обліку груп факторів, які впливають на виконання кожного, окремо взятого, робочого руху, включеного до складу відповідного технологічного переходу.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомо, що на працездатність робітника впливає група факторів, яка породжує фізичну напругу (відстані переміщень, просувань, кути поворотів, габарити і маса переміщуваного вантажу, робочі зусилля) і група факторів, що породжує інформаційну напругу (кількість елементів технологічних об'єктів на робочому місці, яким необхідно приділити увагу для правильної реалізації алгоритму технологічного процесу, кількість правил, що відповідають цьому алгоритму і рівень упорядкованості в організації робочого місця) [1, 3, 4].

Коли визначена конструкція пристосування, що планується використати на проектованій операції, то особливості його приводу або системи закріплення заготовки, вже дають зрозуміти який тип допоміжного інструмента може бути необхідний при проведенні операції. Ця інформація, в свою чергу, визначає множину технологічних прийомів, що може бути застосована в складних організаційно-технологічних умовах [2, 3].

Залежно від глибини і складності алгоритмів роботи з конкретним технічним засобом реалізації технологічних переходів спостерігається певна динаміка росту нервово-емоційної напруги, що приводить до збільшення часу сенсорних реакцій та сповільнює робочий процес [4].

Допоміжний процес машинно-ручної технологічної операції, по суті, представлений послідовною зміною стадій переміщень, збирання та розбирання елементів оснащення і оброблюваної заготовки (деталі) і керування виконавчими механізмами. Метою кожної із цих стадій є або активізація технологічних функцій, або відновлення організаційного порядку на робочому місці, який відповідає, як правило, його відносно раціональному стану з позиції ергономіки [2].

3. Мета роботи. Виявлення аналітичної структури методики розрахунку коефіцієнту інформаційної напруженості в залежності від параметрів технологічного середовища.

4. Основна частина. Якщо результат рішення технологічної підзадачі має неприпустимі характеристики, то це може вимагати, або повторення останнього мікроелемента (комплексу мікроелементів), або пошуку додаткових умов забезпечення рішення технологічної підзадачі. Тому, практично на кожному мікроелементі процесу, структура допоміжного процесу може одержати альтернативний розвиток в рамках вимог операційної технології.

В якості прикладу розглянемо допоміжний процес підготовки автоматичного робочого ходу технологічної операції, яка проводиться на

горизонтально-фрезерному верстаті при фрезеруванні плоскої поверхні заготовки (попередньої бази) циліндричною фрезою в пристосуванні, що складається із системи настановних базуючих поверхонь, упорів і системи кріплення у вигляді прихоплювачів:

- деталь циліндричної форми встановлюється на призми з упором в один з торців і притискається зверху прихоплювачем як показано на рис. 1.

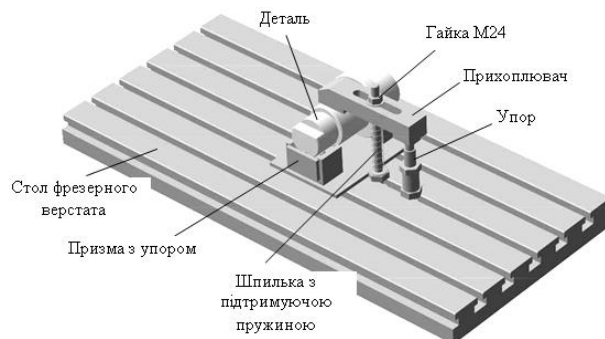


Рис. 1 – Взаємне розташування елементів налагодження пристосування і деталі

Дані операційної карти фрезерної операції наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Дані операційної карти фрезерної операції

Перехід	Встановити, закріпити, зняти деталь
Пристосування	Пристосування фрезерне
Допоміжний інструмент	Ключ гайковий М24

Незважаючи на формулювання переходу «А», послідовність дій по його виконанню починається з перевірки наявності деталі в пристосуванні та, у випадку наявності буде включати у переліку дій зняття деталі (рис. 2):

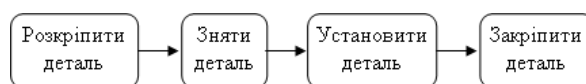


Рис. 2 Перелік комплексів прийомів переходу «А».

Для більш повного відображення множини логічних операцій, що супроводжують даний допоміжний перехід необхідно привести мікроелементний опис кожного комплексу прийомів (табл. 2).

Тривалість майже кожного мікроелемента (окрім логічних операцій) залежить від кількісних та якісних факторів, які характеризують умови його виконання. У табл. 2 і далі, поряд з позначеннями мікроелементів зазначені якісні фактори згідно БСМ-1 [4] з їх ступенями впливу: (К1 – К3), обережності (ОС1, ОС2), щільності з'єднання (П1 – П3), стиснення (СТ1 – СТ3), орієнтування (ОР1 – ОР3), зручності (У1 – У3).

Логічні умови p_i , позначені в таблиці не входять до складу мікроелементів згідно БСМ-1, але

їх треба враховувати під час прив'язки мікроелементної структури до умов технологічної операції.

Таблиця 2 – Мікроелементний склад технологічного прийому по розкріпленню деталі

№ п/п	Опис мікроелемента	Позначення
1.	Перевести погляд на пристосування	ΠB_1
	Чи є деталь у пристосуванні ?	p_1
2.	Перевести погляд на місце зберігання гайкового ключа	ΠB_2
	Чи є ключ М24 ?	p_2
3.	Простягнути руку до ключа	$\Pi P_3(K2, OC1)$
4.	Взяти ключ	$B_4(K2, OC1)$
5.	Перемістити ключ до пристосування	$\Pi_5(K3, OC1)$
6.	Встановити ключ на гайку М24	$Y O_6(\Pi_2, OC1, OP_2, Y1)$
	Чи правильно встановлений ключ ?	p_3
7.	Перехопити ключ для передачі зусилля	$B \Pi_7 O$
8.	Повернути ключ із зусиллям	$\Pi O O_8(OC2)$
9.	Повернути ключ без зусилля	$\Pi O O_9(OC2)$
	Чи досить відкручена гайка ?	p_4
10.	Зняти ключ із гайки	$P_{10}(\Pi_2, OC1, Y1)$
11.	Перемістити ключ у місце зберігання гайкового ключа	$\Pi_{11}(K2, OC1)$
12.	Відпустити ключ	$B \Pi_{12}$

Логічна структура мікроелементного опису комплексу прийомів по зняттю, установці і по закріпленню деталі приведена у вигляді робочого алгоритму на рис.3.

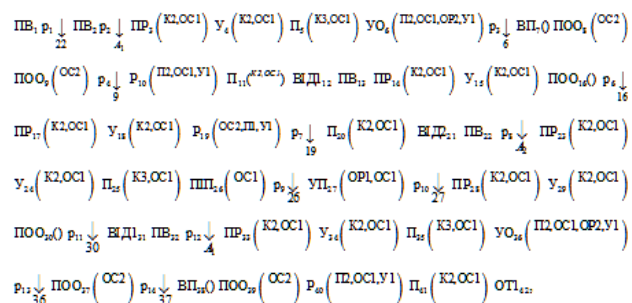


Рис. 3 – Мікроелементна структура алгоритму робочого процесу «Зняття – встановлення – закріплення деталі в пристосуванні»: A_1 – алгоритм пошуку гайкового ключа; A_2 – алгоритм зміни профілю роботи (організаційні заходи або відпрацювання нового завдання).

У даному алгоритмі реалізований послідовний ряд операторів - мікроелементів із циклічними замиканнями в межах одного - двох мікроелементів у місцях появи логічних умов (рис. 4):

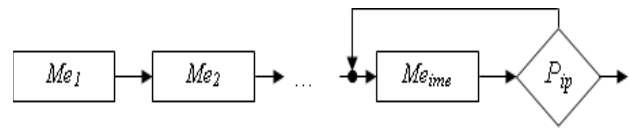


Рис. 4 – Типова блок-схема алгоритму допоміжного переходу при визначеному положенні заготовок, допоміжного інструменту на робочому місці: де $ime = 1, nme_{jp}$ - множина мікроелементів, реалізованих у здійсненні jp -го переходу; $ip = 1, np_{ime}$ - множина логічних умов реалізації мікроелементів.

Технологічна система механічної обробки, що припускає участь виконавця, є такою, що самоорганізується. Тобто її визначеність росте від початку підготовки, встановлення заготовки та до моменту кінця обробки деталі.

Первiсний стан технологічного комплексу відрізняється максимальною ентропією щодо технологічного завдання. Виконавцеві необхідно покрити цю невизначеність, переробивши деякий обсяг інформації й перевіривши технологічний комплекс у стан вищої визначеності за прийнятне для даного виробничого завдання час.

Якщо p це величина невизначеності процесу, реалізованого окремим оператором трудового процесу або комплексом операторів (трудова дія, прийом і т.ін.), то $1-p$ - це величина впорядкованості відповідного процесу. Тоді

$$MR_j = 1 - \frac{N_j^{evr}}{N_j}, \quad (1)$$

де N_j^{evr} - кількість об'єктів уваги зі слабо прогнозованими (рівновірогідними) станами (показання міряльного інструмента, поломки в системі «Верстат – Пристосування – Інструмент – Деталь» та т.ін.).

Визначеність величина зворотна до ентропії (H), тому зміни міри визначеності для технологічної операції можна проілюструвати таким чином (рис. 5):

Чим ближче технологічна операція до свого завершення, тим менше її невизначеність - менше логічних операцій залишається виконати. Величина впорядкованості стану технологічної системи, що відповідає моменту завершення обробки приблизно складе: $MR_{jo}(t)|_{t=t_{on}} \approx 0,875$.

З іншого боку, технологічна система це сукупність об'єктів технологічного і організаційного призначення, які виконують основні і допоміжні функції по підготовці і реалізації технологічних переходів та переміщенню деталі. Для виконання окремих технологічних прийомів необхідно розглядати деяку, відповідну кожному з них, підмножину об'єктів уваги. Усередині цієї підмножини є деяка група об'єктів, зміна властивостей яких необхідна для виконання технологічного прийому. Для зміни характеристик групи маніпулюємих об'єктів визначається множина

логічних операторів, що контролюють рівні активізації їхніх функціональних станів.

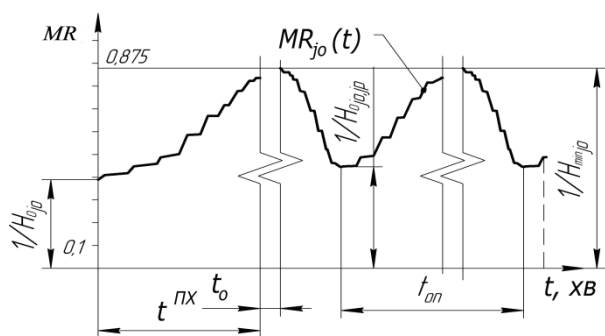


Рис. 5 – Зміни значення міри визначеності ($MR_{jo}(t)$)

при циклічному відпрацьовуванні технологічної операції дрібносерійного виробництва: $H_{0,jo}$ - ентропія технологічної системи обробки різанням перед початком проведення jo -ої операції обробки; $H_{0,jo,jp}$ - ентропія технологічної системи обробки різанням наприкінці кожного одноперехідного циклу обробки; $H_{min,jo}$ - ентропія технологічної системи обробки при максимальному ступені визначеності (деталь у пристосуванні на верстаті, вже оброблена); $t_{пх}$ - час підготовки jo -ої операції обробки, хв; $t_о$ - основний час, хв; $t_{оп}$ - оперативний час, хв.

Наприклад, для визначення станів об'єктів технологічної системи, таких як $S_{об'єкт\ обобки} = \{заготівка, деталь\}$ або $S_{пристосування} = \{зайнято, вільно\}$ можна використати однібітну операцію («0» або «1»).

По мірі виконання мікроелементів робочого процесу виконуються відповідні їм логічні оператори. Зменшення кількості логічних операторів, що залишилися, а разом з ними і розглядаємих характеристик об'єктів, збільшує визначеність технологічного комплексу у зв'язку з реалізацією відповідного технологічного прийому.

Для прив'язки мікроелементів робочих рухів до оперативного простору використовується формалізація їхніх умов реалізації у вигляді нечіткої моделі фрагментів робочого простору, у якій зв'язки між елементами регламентуються нечіткими відносинами із застосуванням лінгвістичних змінних. Наприклад, для мікроелемента «ПОО - повернути об'єкт навколо його осі» необхідно забезпечити умови реалізації, представлені в таблицях 3 і 4.

У таблиці 4: Sv 1-1- відстань між суб'єктом і об'єктом, відповідає 1-му діапазону (0 - 0,025м); DDF3 - ступінь зв'язку суб'єкта з об'єктом, відповідає 3-му діапазону (позбавлення 3 – 4 ступенів волі); INC3 - рівні включення об'єкта 1 в об'єкт 2, відповідає 3-му діапазону (позбавлення 4 – 5 ступенів свободи); SOA+ - відношення доступності об'єкта і його підсистем щодо суб'єкта, відповідає 1-му діапазону (є простір для маніпуляцій з об'єктом для даного мікроелемента); YR2, YR1 – значення кутів повороту

об'єкта щодо інших об'єктів (відповідає 2-му і 1-му діапазонам: 30-1800 і 0-300).

Таблиця 3 – Опис умов реалізації мікроелемента ПОО

1) Рука на об'єкті (після мікроелемента ВЗ – узятися);
2) Об'єкт має ступінь волі повороту навколо своєї осі на кут від 300 до 1800 .
3) Початкові кутові координати об'єкта.

Таблиця 4 – Лінгвістичні змінні, задіяні при визначенні умов реалізації

№	до реалізації	після реалізації
1	Sv1, DDF3	Sv1, DDF3
2	INC4, SOA+,	INC4
3	YR2	YR1

Як видно з опису умов реалізації мікроелемента ПОО виконавцеві перед його реалізацією потрібно обробити комплекс сигналів по взаємному положенню руки і об'єкта, оцінити ступеня свободи об'єкта щодо системи, оцінити простір у напрямку повороту, а потім зробити поворот, одночасно відслідковуючи кут між характерними поверхнями об'єкта (руки) і поверхнями інших об'єктів. Тобто система повинна мати у своєму розпорядженні достатню визначеність для його реалізації. Рівень ентропії системи нечітких відносин можна виразити формулою, відповідно до джерела [7]:

$$H(me_j) = - \sum_{i=1}^{nr} \mu_i(r_{i,id}) \log_2 \mu_i(r_{i,id}), \quad (2)$$

де me_j – j -й мікроелемент, $j=1..n_{me}$; $\mu_i(r_{i,id})$ – функція нечіткої приналежності i -ої відносини id -му діапазону значень; $i=1..nr$ – ножина відносин розглянутих у контексті даного мікроелемента.

Наявність таких відносин як DDFid, INCid, SOAid, може закладати попереднього визначення їхніх значень, сполученого з появою відповідних умов і розгалуження алгоритму машинно-ручного процесу (рис.6).

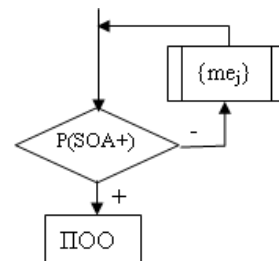


Рис. 6 – Розгалуження алгоритму машинно-ручного процесу.

Таким чином, типовий мікроелементний комплекс у неорганізованому технологічному середовищі може генерувати умови і алгоритмічну розмаїтість, що підвищить ентропію трудового процесу і інтенсивність переробки інформації виконавцем. Крім того, при реалізації мікроелемента об'єктна розмаїтість у різних виробничих середовищах при визначенні цих відносин також буде

відрізнитися, що вимагає задіяти спеціалізовані технології розпізнавання.

Визначити складність машинно-ручного процесу можна, керуючись правилом, що говорить про те, що вона прямо пропорційна розмаїтості об'єктів уваги, задіяних у даному процесі і обернено пропорційна мірі його впорядкованості:

$$\text{Diff} = \frac{\ln(N(me_j))}{e^{1-P(me_j)}}, \quad (3)$$

де $\ln(N_j)$ - міра розмаїтості об'єктів уваги (задіяних функціональних елементів); e^{1-P} - міра впорядкованості процесу.

У джерелі [6] запропонована методика розрахунку показника складності машинно-ручного процесу, що заснований на поверхневому підрахунку членів алгоритму і умов робочого процесу з обліком їх ентропій як незалежних випадкових подій.

Тим часом, якщо дотримуватися джерела [8], будь-який машинно-ручний процес має багаторівневу структуру. Тобто він розбитий на підготовчі і основні етапи у відношенні кожного технологічного циклу і циклу маніпуляцій з технічними засобами практично на всіх рівнях укрупнення. Наприклад, моделі другого рівня укрупнення - трудові дії припускають найпростіші комплекси мікроелементів:

$$\begin{cases} A.B1 = \{PP1 - B1\} \\ A.P1 = \{PP1 - B1 - P1\} \\ A.X.P1 = \{X - PP1 - B1 - P1\} \end{cases}, \quad (4)$$

де A.B1 - комплекс «протягнути руку - взяти»; A.P1 - комплекс «протягнути руку - взяти - роз'єднати»; A.X.P1 - комплекс «ходити - протягнути руку - взяти - роз'єднати».

Тут напрошується висновок – поява практично всіх елементів машинно-ручного процесу взаємообумовлена, принаймні, у рамках моделі трудової дії. Виходить, при підрахунку ентропій операторів і логічних умов необхідно користуватися матрицями умовних ймовірностей їхньої появи.

Наприклад, з появою мікроелемента «ПР1», що зустрічається в моделях 9 разів умовна ймовірність появи мікроелемента «В1», що зустрічається разом з «ПР1» 8 разів складе 0,88, а мікроелемента «НР1» - 0,11 (зустрічається з «ПР1» тільки один раз).

Таким чином, вираження для визначення умовної ентропії появи мікроелемента може мати вигляд:

$$H(me_{j+1}/me_j) = \sum_j^{n_{Me}} \sum_j^{n_{Me}} p(me_{j+1}) p(me_{j+1}/me_j) \times \log_2 p(me_{j+1}/me_j), \quad (5)$$

де $j=1..n_{Me}$ - множина мікроелементів; $p(me_{j+1})$ - ймовірність появи мікроелемента, що залежить від специфіки процесу і умов його реалізації; $p(me_{j+1}/me_j)$ - умовна ймовірність появи мікроелемента me_{j+1} після появи мікроелемента me_j .

Ентропія трудової дії буде являти собою ентропію об'єднання відповідних мікроелементів:

$$H(Me_{ja}) = H(me_j, me_{j+1}, me_{j+2}, \dots, me_{j+k}) = H(me_j) + H(me_{j+1}/me_j) + H(me_{j+2}/me_j, me_{j+1}) + \dots + H(me_{j+k}/me_j, me_{j+1}, \dots, me_{j+k-1}) \quad (6)$$

де $H(Me_{ja})$ - ентропія ja -ї трудової дії

Розрахунок ентропії появи логічної умови також може реалізовуватися за цією методикою, але при врахуванні наявності в комплексі 2-го рівня укрупнення мікроелементів, що вимагають перевірки відповідних відносин $u(r_{ir,ja})$, де $r_{ir,ja}$ - іг-е відношення ja -го комплексу:

$$H(u(r_{ir,ja})/\{me_j\}_{ja}) = \sum_{ju_{ir,ja}}^{nu_{ir,ja}} \sum_j^{n_{Me}} p(u(r_{ir,ja})) \times p(u(r_{ir,ja})/\{me_j\}_{ja}) \log_2 p(u(r_{ir,ja})/\{me_j\}_{ja}) \quad (7)$$

де $\{me_j\}_{ja}$ - ja -ий мікроелементний комплекс 2-го рівня укрупнення, $j=1..n_{Me}$ - кількість мікроелементів у комплексі; $p(u(r_{ir,ja}))$ - ймовірність появи логічної умови, що залежить від специфіки процесу і умов його реалізації; $ju_{ir,ja}=1..nu_{ir,ja}$ - множина варіантів вибору, відповідно до умови; $p(u(r_{ir,ja})/\{me_j\}_{ja})$ - умовна ймовірність появи ja -го мікроелементного комплексу після появи значення умови $u(r_{ir,ja})$.

Ентропія об'єднання умови і можливої трудової дії складе:

$$H(u(r_{ir,ja}), \{me_j\}_{ja}) = H(u(r_{ir,ja})) + H(\{me_j\}_{ja}/u(r_{ir,ja})), \quad (8)$$

У підсумку, відповідно до формули Зараковського [6], швидкість обробки інформації виконавцем при виконанні моделі, що відповідає, наприклад, третьому рівню укрупнення - трудовому прийому, можна визначити з вираження:

$$V(Me_{jp}) = \frac{1}{t_{jp}} \left[\sum_{ja}^{n_{ja}} H(Me_{ja}) + \sum_{ja}^{n_{ja}} H(u(r_{ir,ja}), Me_{ja}) + \sum_j^{n_j} H(Me_j) \right], \quad (9)$$

де Me_{jp} - трудовий прийом, $jp=1..n_{jp}$ - множина трудових прийомів у складі переходу; t_{jp} - час виконання трудового прийому.

Описана вище методика дозволяє застосувати ймовірнісний метод визначення кількості інформації для визначення інтенсивності її сприйняття виконавцем за рахунок використання апарата нечіткої логіки, що дозволяє уніфікувати інформацію про характеристики об'єктів технологічного комплексу і зв'язках між і ними замінивши алфавіт дискретизацією діапазонів відносин, а ймовірності - функцією приналежності. Таким чином, показник $V(Me_{jp})$ можна, у деякому наближенні, інтерпретувати як інтенсивність сприйняття

інформації робітником, що вже має фізичний зв'язок із часом виконання роботи.

Для застосування показника складності машинно-ручного процесу при корекції часу його реалізації необхідно задіяти співвідношення рівнів інтенсивності досліджуваного процесу і аналогічного, чітко пронормованого процесу з оптимальною інтенсивністю, що прийнятий за базу.

$$\Delta_{jp} = \frac{\delta_{jp}}{\delta_{jp}^b}, \quad (10)$$

де δ_{jp} інтенсивність переробки інформації в досліджуваному технологічному прийомі: $\delta_{jp} \equiv V(Me_{jp})$; δ_{jp}^b інтенсивність переробки інформації в базовому процесі праці, що функціонально відповідає досліджуваному технологічному прийому, але ретельно вивчений і пронормован.

За базовий можна прийняти Трудовий процес із мінімально припустимою кількістю функціональних елементів (об'єктів уваги), у якому відсутні логічні умови. Він практично оптимальний з погляду переробки інформації.

У систему мікроелементних нормативів часу (БСМ-1) був закладений психофізіологічно припустимий рівень інтенсивності праці або темпу роботи, при якому стомлення протягом зміни не перевищує припустимого. Нормативами визначений психофізіологічно оптимальний темп роботи, що характеризується оптимальним рівнем функціонування організму, який сприяється виконавцем як найбільш зручний. Це дає можливість прийняти процес виконання мікроелементів при відсутності умов як базовий і визначати відносні рівні інтенсивності у вигляді коефіцієнтів.

Тоді, якщо

$$\delta_{jp}^b = \frac{n_{jp}^b}{t_{jp}^b}, \quad (11)$$

де n_{jp}^b – число мікроелементів у базовому процесі трудового прийому; t_{jp}^b – час виконання базового процесу трудового прийому, хв.

То

$$\Delta_{jp} = \frac{t_{jp}^b \cdot V(Me_{jp})}{t_{jp} \cdot n_{jp}^b}, \quad (12)$$

Таким чином, коефіцієнт інформаційної напруженості може бути виражений з урахуванням показників стереотипності (St_{jp}) і логічної складності (L_{jp}), що розраховуються за методикою із джерела [6] і відносного рівня інтенсивності (Δ_{jp}).

$$Kit_{jp} = \frac{St_{jp}}{L_{jp}} \cdot \Delta_{jp} \cdot Ks, \quad (13)$$

де Ks – коефіцієнт психічної напруги виконавця, що залежить від ступеня достатності часу, що залишається для виконання всієї роботи, [9];

Психічна напруга виконавця нарастає протягом всієї роботи і залежить від планового параметра виконання виробничого завдання. Виділяють три ситуації:

– не термінова – часу досить для завершення всіх завдань ($c = 1$);

– термінова – часу вистачає тільки на завершення істотних завдань ($c = 2$);

– у край термінова – часу не вистачає навіть для завершення істотних завдань ($c = 3$).

Для не термінових і термінових ситуацій показник психічної напруги практично не враховують. Для в край терміновій ситуації психічна напруга істотно впливає на час виконання прийомів.

Якщо врахувати те, що реалізація технологічного процесу механічної обробки не носить екстремальний характер (не загрожує аварією) і, якщо не брати до уваги особистісні характеристики кожного робітника (емоційність, характер і т.д.), то коефіцієнт обліку психічної напруги (Ks) можна розрахувати із вираження (14):

$$Ks = \begin{cases} -1.829x^3 + 3.472x^2 - 2.35x + 1 & \text{if } s(\sum t, T, c) < M \\ s(\sum t, T, c) + 1 - M & \text{if } M \leq s(\sum t, T, c) \leq M + 1 \end{cases}, \quad (14)$$

де $x = \left(\frac{s(\sum t, T, c) - 1}{M - 1} \right)$; $s(\sum t, T, c)$ – показник

психічної напруги виконавця; $\sum t$ – вже витрачений до моменту виконання прийому час; T – повний час, наявний в розпорядженні у виконавця; c – показник терміновості виконання роботи:

$$\begin{cases} c = 1 & \text{if } T - \sum t \gg \sum \overline{t^E} \\ c = 2 & \text{if } T - \sum t = \sum \overline{t^E} \\ c = 3 & \text{if } T - \sum t < \sum \overline{t^E} \end{cases}, \quad (15)$$

де $\sum \overline{t^E}$ – середнє значення часу виконання всіх

істотних завдань, що залишилися, mE – кількість істотних завдань, що залишилися; M – значення порога стресу для середньостатистичної людини $M = 2,3$ [9].

Показник психічної напруги можна знайти із вираження (16):

$$s(\sum t, T, c) = \begin{cases} 1 & \text{if } (c = 1) \vee (c = 2) \\ \frac{\sum_{jp^E=jp} \overline{t_{jp^E}^E}}{T - \sum t} & \text{if } (c = 3) \end{cases}, \quad (16)$$

де $\sum t = \sum_{jp1=1}^{jp-1} t_{jp1}$, де $jp1 = 1, jp$ – множина прийомів

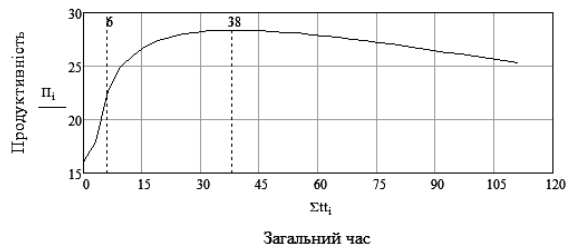
трудоного процесу вже реалізованих при виконанні виробничого завдання; $\overline{t_{jp^E}^E}$ – середнє значення часу

виконання j_p -ого істотного завдання, $j_p^E = \overline{1, mE}$ – множина істотних завдань, розв'язуваних при виконанні роботи.

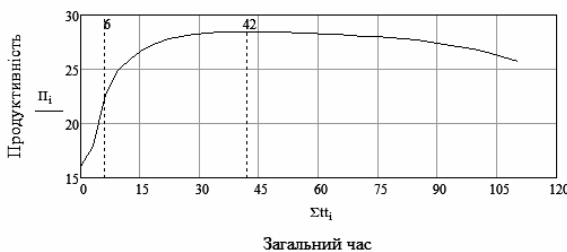
У підмножині умку, витрати часу виконання машинно-ручного процесу (наприклад трудового прийому) виконавцем складуть:

$$t_{jp} = t_{jp}^{BCM}(Ff, Fk) \cdot KF_{jp} \cdot Kit_{jp} \cdot KS_{jp}, \quad (17)$$

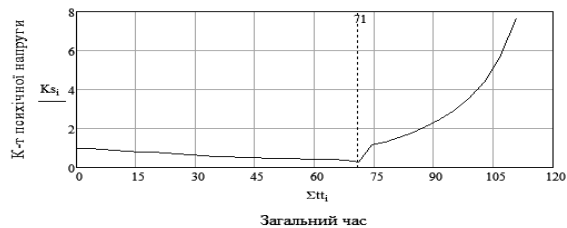
де $t_{jp}^{BCM}(Ff, Fk)$ – час, розрахований по BCM [4], з урахуванням множин кількісних (Ff) і якісних (Fk) факторів; KF_{jp} – коефіцієнт фізичної напруги; KS_{jp} – коефіцієнт, що враховує типовість і повторюваність виконуваного машинно-ручного процесу.



а)



б)



в)

Рис. 7 – Показники продуктивності (а, б) і психічної напругеності (в) залежно від загального часу проведення

операції: а) $\sum_{mE} t^E \ll T - \sum t$; б) і в) $\sum_{mE} t^E > T - \sum t$

У ході синтезу мікроелементної структури, представленої на рисунку 2 прийомів машинно-ручної роботи установки і закріплення деталі в пристосуванні при виконанні технологічної операції «Фрезерування лиски» були отримані залежності продуктивності їхнього виконання від числа повторень (рис.7). Імітувалося повторення операції тривалістю 3,6 хв, яка повторювалась на протязі 2 годин. При цьому змінювався показник терміновості виконання через плановий час виконання T і час, що залишився на рішення істотних $\sum_{mE} t^E$ завдань. При

$KS=1$ машинно-ручний процес має апіорні

показники трудомісткості одиничного процесу, тому що із самого початку в методику розрахунку закладений максимальний рівень ентропії, і невизначеність ситуації може різко вирости з появою будь-якого якісного показника із умов реалізації мікроелемента, що вимагає додаткових робіт. Тому коефіцієнт типовості виконуваної роботи KS відповідав 0,75.

На графіках (рис. 7) відображені зміни продуктивності і напруженості процесу виконання прийомів установки - зняття деталі із пристосування. Під продуктивністю розуміється кількість виконуваних мікроелементів у хвилину.

На рисунку 7 а) можна виділити фазу впрацювання, пікової продуктивності і її стабільного зниження внаслідок росту інформаційної напруженості. рисунки 7 б) і 7 в) демонструють більш стійку фазу пікової працездатності внаслідок росту психічної напруги через недолік часу, але після 71 хвилини відбувається вихід за граничне значення напруженості і більш круте падіння продуктивності ніж на рис. 7 а).

Висновки. Надано обґрунтування можливості моделювання зростання інформаційної та психологічної напруги виконавця машинно-ручного процесу роботи технологічного комплексу із застосуванням комбінаційного апарату нечітких множин та розрахунків ентропії станів виробничої системи. Показано, що створена модель продемонструвала очікуваний результат, представлений у літературі [10]: ріст показника терміновості виконання роботи приводить до росту продуктивності у визначених межах.

Надалі передбачається частково замінити коефіцієнт KS функціональними залежностями якісних показників умов реалізації, які враховували б повторюваність процесу і рівень його організації, відображаючи ці показники на необхідність появи умови перед виконанням мікроелементом.

Представлений підхід дозволяє забезпечити порівняльний аналіз моделей машинно-ручної роботи, що надасть можливість побудови більш оптимальних план-графіків роботи ділянок механічної обробки.

Список літератури

1. Рузметов А.Р. Методика визначення функцій приналежності в системі проектування мікроструктури технологічного переходу / А.Р. Рузметов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085). – С. 139 – 147.
2. Рузметов А.Р. К вопросу о имитационном моделировании машинно-ручных технологических операций в системах обработки металлов резанием / А.Н. Шелковой, Л.Б. Шрон, Г.И. Ищенко, А.Р. Рузметов, М.С. Семченко // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015 – №10. – С. 177 – 191.
3. Рузметов А.Р. Оптимізація допоміжного процесу механічної обробки різанням з урахуванням організаційно технологічних витрат / А.Р. Рузметов // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 4/1 (24). – С. 77 – 83.
4. Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1). Нормативно производственное издание / под. ред. С. А. Юровского. — М: Экономика. — 1989. — 122 с.

5. Психологія: Підручник / Ю.Л.Трофімов, В.В.Рибалка, П.А. Гончарук / ред. Ю.Л.Трофімов – Київ, 1999.
6. Трофімов Ю.Л. Інженерна психологія: Підручник – Київ: Либідь, 2002 – 264 с.
7. Федотов В.Х. Оценка неопределенности сложных нечетких систем / Федотов В.Х., Новожилова Н.В. // Вестник чувашского университета № 2 2011 ЧГУ им. И.Н. Ульянова С.488-493.
8. Методические рекомендации по расчету на ЭВМ норм времени на базе микроэлементных нормативов / ред. С. А. Юровский, В. Х. Педро // Нормативно-производственное издание. — М: Экономика, 1989. — 54 с.
9. Зигель А. Модели группового поведения в системе человек-машина с учетом психосоциальных и производственных факторов / А. Зигель, Дж. Вольф. — Издательство «Мир» Москва 1973 – 259 с.
10. Интегральная оценка работоспособности при умственном и физическом труде. Методические рекомендации. / Отв. за выпуск З. С. Богатыренко. — Издание второе, переработанное и дополненное. — Москва Экономика 1990. — 108 с.
3. Ruzmetov A.R. Optimizaciya dopomizhnogo procesu mehanichnoyi obrobki rizannyam z urahuvannyam organizacijno tehnologichnih vitrat / A.R. Ruzmetov // Tehnologichnij audit ta rezervi virobnictva. – 2015. – № 4/1 (24). – S. 77 – 83.
4. Bazovaya sistema mikroelementnyh normativov vremeni (BSM-1). Normativno proizvodstvennoe izdanie / pod. red. S. A. Yurovskogo. — M: Ekonomika. — 1989. — 122 s.
5. Psihologiya: Pidruchnik / Yu.L.Trofimov, V.V.Ribalka, P.A. Goncharuk / red. Yu.L.Trofimov – Kyiv, 1999.
6. Trofimov Yu.L. Inzhenerna psihologiya: Pidruchnik – Kyiv: Libid, 2002 – 264 s.
7. Fedotov V.H. Ocenka neopredelennosti slozhnyh nechetkih sistem / Fedotov V.H., Novozhilova N.V. // Vestnik chuvashskogo universiteta № 2 2011 ChGU im. I.N. Ulyanova S.488-493.
8. Metodicheskie rekomendacii po raschetu na EVM norm vremeni na baze mikroelementnyh normativov / red. S. A. Yurovskij, V. H. Pedro // Normativno-proizvodstvennoe izdanie. — M: Ekonomika, 1989. — 54 s.
9. Zigel A. Modeli gruppovogo povedeniya v sisteme chelovek-mashina s uchetoм psihosocialnyh i proizvodstvennyh faktorov / A. Zigel, Dzh. Volf. — Izdatelstvo «Mir» Moskva 1973 – 259 s.
10. Integralnaya ocenka rabotosposobnosti pri umstvennom i fizicheskom trude. Metodicheskie rekomendacii. / Otv. za vipusk Z. S. Bogatyrenko. — Izdanie vtoree, pererabotannoe i dopolnennoe. — Moskva Ekonomika 1990. — 108 s.

References (transliterated)

Поступила (received) 20.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рузметов Андрій Русланович (Ruzmetov Andrey Ruslanovich) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра Кафедра технології машинобудування й металорізальних верстатів НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6495-9099>; e-mail: arnzetg@gmail.com

Ушаков Олександр Миколайович (Ushakov Aleksandr Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра Кафедра технології машинобудування й металорізальних верстатів НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1964-5450>; e-mail: parom38@yandex.ua

КЛИМЕНКО Г.П., МИРОНЕНКО Е.В., ФАДЕЕВ В.А., ЗАКОВОРОТНЫЙ А.Ю. ИЩЕНКО Г.И.

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА СЕМЕЙСТВ КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ БЛОЧНО – МОДУЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ

В статье рассмотрены целевые функции представительства семейств критериев оптимизации блочно - модульного инструмента на тяжелых токарных станках, которые учитывают свойства технологических систем и критерии их оптимальности. Для обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей инструмента предложены коэффициенты для функций эксплуатации, являющиеся целевыми, которые показывают взаимосвязь эксплуатационной, технологической и стоимостной функций. Для получения значений весовостей критериев и отбора необходимого числа критериев для оптимизации параметров блочно-модульного режущего инструмента и режимов его эксплуатации на стадии проектирования использовались положения теории информации. Для получения представительного семейства критериев для многокритериальной и многопараметрической оптимизации процессов механической обработки предложена система критериев: критерий полноты; критерий минимальности, критерий операционности, критерий измеримости; критерий автономной информативности; критерий экономичности. Для определения весовостей критериев оптимальности режущего инструмента и технологической системы предложено использовать показатели информативности - полноты оценки совокупности свойств, составляющих качество модульного инструмента и определяющих эффективность данных критериев и значимость этого критерия, как для завода-изготовителя, так и для завода-потребителя с точки зрения его влияния на цену инструмента. Для оптимизации параметров технологической системы была проведена экспертная оценка, учитывающая различные условия производства, как с позиции предприятия изготовителя, так и с позиции предприятия потребителя.

Ключевые слова: эксплуатационная, технологическая, стоимостная функция, критерий оптимизации, блочно - модульный инструмент, тяжелые токарные станки, представительство семейства критериев, экспертная оценка,

КЛИМЕНКО Г.П., МИРОНЕНКО Е.В., ФАДЕЕВ В.А., ЗАКОВОРОТНЫЙ А.Ю. ИЩЕНКО Г.И.

ЦІЛЬОВІ ФУНКЦІЇ ПРЕДСТАВНИЦТВА СІМЕЙСТВА КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ БЛОЧНО - МОДУЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ

У статті розглянуті цільові функції представництва сімейств критеріїв оптимізації блочно - модульного інструменту на важких токарних верстатах, які враховують властивості технологічних систем і критерії їх оптимальності. Для забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь інструменту запропоновані коефіцієнти для функцій експлуатації, є цільовими, які показують взаємозв'язок експлуатаційної, технологічної та вартісної функцій. Для отримання значень вагомості критеріїв і відбору необхідної кількості критеріїв для оптимізації параметрів блочно-модульного ріжучого інструменту і режимів його експлуатації на стадії проектування використовувалися положення теорії інформації. Для отримання представницького сімейства критеріїв для багатокритеріальної і багатопараметричної оптимізації процесів механічної обробки запропонована система критеріїв: критерій повноти; критерій мінімальності, критерій операціональності, критерій вимірності; критерій автономної інформативності; критерій економічності. Для визначення вагомості критеріїв оптимальності ріжучого інструменту і технологічної системи запропоновано використовувати показники інформативності - повноти оцінки сукупності властивостей, які складають якість модульного інструменту і визначають ефективність даних критеріїв і значимість цього критерію, як для заводу-виробника, так і для заводу-споживача з точки зору його впливу на ціну інструменту. Для оптимізації параметрів технологічної системи була проведена експертна оцінка, що враховує різні умови виробництва, як з позиції підприємства-виробника, так і з позиції підприємства споживача.

Ключові слова: експлуатаційна, технологічна, вартісна функція, критерій оптимізації, блочно - модульний інструмент, важкі токарні верстати, представництво сімейства критеріїв, експертна оцінка.

KLIMENKO G.P., MIRONENKO E.V., FADEEV V.A., ZAKOROTNY A.Yu. ISCHENKO G.I.

TARGET FUNCTIONS OF THE REPRESENTATIVE OFFICE OF FAMILIES OF CRITERIA FOR OPTIMIZATION CRITERIA OF BLOCK - MODULAR TOOL ON HEAVY MACHINES

The article discusses the target functions of family representation, the criterion of optimization of the block - modular tool on heavy lathes, which take into account the properties of technological systems and the criteria for their optimality. To ensure the operational properties of tool surfaces, coefficients are proposed for the operating functions, which are target ones, which show the interconnection of operational, technological and cost functions. To obtain the values of the weighting criteria and selecting the necessary number of criteria for optimizing the parameters of a block-modular cutting tool and its operating modes at the design stage, the provisions of information theory were used. To obtain a representative family of criteria for multi-criteria and multi-parameter optimization of machining processes, a system of criteria is proposed: a completeness criterion; criterion of minimality, criterion of operability, criterion of measurability; autonomous information content criterion; criterion of profitability. To determine the weight of the criteria for optimality of the cutting tool and the technological system, it is proposed to use information indicators - the completeness of the assessment of the set of properties that make up the quality of a modular tool and determine the effectiveness of these criteria and the significance of this criterion, both for the manufacturer and the consumer plant in terms of its influence on the price of the instrument. To optimize the parameters of the technological system, an expert assessment was carried out, taking into account various production conditions, both from the position of the manufacturer and from the position of the consumer.

Key words: operational, technological, cost function, optimization criterion, block - modular tool, heavy lathes, representation of a family of criteria, expert assessment.

1. Введение. Согласно требованиям системного подхода необходимо выявить достаточно полную номенклатуру критериев, обуславливающих эффективность механической обработки деталей на тяжелых станках. При этом необходимо рассмотреть их с точки зрения возможности установления связи с управляющими переменными, то есть получение целевых функций.

Так как получение и использование целевых

функций в ряде случаев является достаточно сложной задачей, требуется показать, как в каждом конкретном случае выбрать представительное семейство критериев (ПСК). Например, для обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей инструмента могут быть применены коэффициенты для функций эксплуатации, являющиеся целевыми, которые показывают взаимосвязь эксплуатационной, технологической и стоимостной функций (табл. 1):

© Г.П. Клименко, Е.В. Мироненко, В.А. Фадеев, А.Ю. Заковоротный, Г.И. Ищенко, 2020

Таблица 1 – Взаимосвязь эксплуатационной, технологической и стоимостной функций

№	Название коэффициента и пояснения	Выражение для нахождения коэффициента
1	Коэффициент совместимости данного метода обработки при обеспечении эксплуатационных свойств	$K_1 = P(\cap D_{ij}) = \prod_{N=1}^{n-m} P(D_{\Sigma ij})$ (1)
	Коэффициент показывает насколько обоснованно применять метод для совместного обеспечения нескольких требуемых комплексных показателей, характеризующих эксплуатационные свойства поверхности	
2	Вероятность обеспечения заданных эксплуатационных свойств данным методом обработки	$K_2 = P(\cap A_{ij}) = \prod_{N=1}^{n-m} P(A_{\Sigma ij})$ (2)
	Коэффициент показывает насколько обоснованно применен метод для обеспечения заданных значений комплексных и регламентируемых параметров состояния поверхности	
3	Коэффициент эффективности использования данного метода обработки	$K_3 = \frac{K_2}{K_1}$ (3)
	Коэффициент указывает на уровень ограничений, которые необходимо ввести при использовании рассматриваемого метода обработки	
4	Коэффициент обоснованности регламентации	$K_4 = P(\cap P_{ij}) = \prod_{N=1}^{n-m} P(P_{\Sigma ij})$ (4)
	Коэффициент показывает насколько правильно назначены границы регламентации на стадии конструкторской проработки	$P(P_{\Sigma ij}) = S_{P\Sigma ij} / S_{Pij}$ (5)
5	Коэффициент обеспечения значений обоснованной регламентации	$K_5 = S_{A\Sigma ij} / S_{P\Sigma ij}$ (6)
	Коэффициент показывает какая часть множества регламентированных значений обеспечивается данным методом обработки	
6	Максимальная величина технологических затрат	$K_6 = C_{A\Sigma \max}$ (7)
		$K_7 = C_{D\Sigma \max}$ (8)
7	Коэффициент возможных снижений затрат	$K_8 = \frac{C_{A\Sigma \max} - C_{A\Sigma \min}}{C_{A\Sigma \max}}$ (9)
		$K_9 = \frac{C_{D\Sigma \max} - C_{D\Sigma \min}}{C_{D\Sigma \max}}$ (10)
	Коэффициент показывает каковы потенциальные возможности снижения технологических затрат при обеспечении заданных эксплуатационных свойств данным методом обработки	

2. Анализ последних исследований и публикаций.

С целью выявления и предварительного выбора критериев в табл. 2 приведены характеристики технологической системы и входящих в нее элементов, а также показатели этих свойств, некоторые из которых целесообразно принять за критерии оптимальности.

Рассматриваемые критерии разделены на 3 группы: технико-экономические, экономические и связанные с человеком (человеческий фактор).

Среди свойств назначения и вообще технико-экономических свойств важным является качество поверхности. Однако качество требуется не "чем выше, тем лучше", а определенное - заданное чертежом детали и другой документацией. Поэтому качество обработки в большинстве случаев целесообразно учитывать в ограничениях. Так, точность обработки может потребовать наложения

функциональных ограничений непосредственно на показатели точности или на силы резания, например:

$$P_Y < P_{YT}, \quad (11)$$

Где, P_Y – радиальная составляющая силы резания; P_{YT} – допустимая радиальная сила по точности обработки.

Обеспечение требуемой шероховатости поверхности требует введения ограничения подачи. Например, при точении:

$$S_{III} < C_M R_Z^{lu} V^{nu}, \quad (12)$$

Где, S_{III} – подача; C_M – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и других факторов; R_Z – высота неровностей; V – скорость резания.

Вторым важнейшим свойством, относящимся к свойствам назначения, является производительность обработки. Она складывается из производительности процесса резания и времени восстановления

технологической системы. Показателем производительности обработки служит штучное время t_{um} :

$$t_{um} = t_0 \left(1 + \frac{t_B}{T} \right), \quad (13)$$

где, t_0 – время резания; t_B – время смены инструмента; T – стойкость.

При строгом определении свойством назначения является не производительность обработки $1/t_{um}$, а производительность процесса резания, так как цель ТС – формообразование детали, которое осуществляется в процессе резания. Его критерий – основное время t_0 . Для тяжелых станков удобно критерием производительности восстановления технологической системы (ТС) принимать время восстановления t_B . Это очень информативный показатель. Он отражает также ремонтпригодность. Поэтому t_B можно рассматривать как один из критериев надежности. Кроме того, t_B учитывает эргономические характеристики ТС.

В последние годы большое внимание уделяют свойству гибкости, возможности использования ТС для различной обработки и приспособленности к переходу на другую обработку с минимальными потерями средств. Это свойство также отражается на времени восстановления. Поэтому, если рассматривать достаточно большой отрезок времени, в течение которого обрабатывают различные детали и выполняют различные переходы, t_B является также показателем гибкости ТС.

Рассмотрим все аспекты обеспечения гибкости инструмента. Например, большое значение имеет широта диапазона элементов режима резания, в

пределах которого осуществляется устойчивое стружкодробление. Его показателем может, например, служить соответствующий диапазон подач ΔS_C .

Важным в современном производстве является свойство надежности. Из свойств, составляющих надежность, остановимся на безотказности и долговечности. Они, в свою очередь, обуславливаются главным образом виброустойчивостью ТС, прочностью и износостойкостью инструмента, сохраняемостью до съема резца, способностью к стружкодроблению.

Показателем прочности твердосплавного инструмента для тяжелых станков является число периодов стойкости до разрушения К-пластины и К_М-модуля. Для инструмента со сменными многогранными пластинами вместо К может применяться q – доля или вероятность поломок, причем:

$$K = Z_B(1 - q), \quad (14)$$

где, Z_B – число вершин или граней. Произведение $K_T = \sum T$ – полный период стойкости является критерием долговечности инструмента.

Рассмотренные временные критерии надежности являются случайными величинами, которые испытывают рассеивание под действием изменения инструмента и обрабатываемого материала, жесткости ТС, состояния и квалификации станочника и других факторов. Поэтому обозначим большими буквами $K_B, K_\sigma, K, T, T_C, \sum T$ средние значения показателей надежности для определенной выборки.

Таблица 2 – Характеристики технологической системы



Специфическим критерием безотказности является гамма-процентный период стойкости T_γ – то есть период стойкости, который выдерживают γ % инструментов. Очень удобным показателем безотказности является коэффициент вариации стойкости $W_T, T_\gamma, W_T, \sum T$ зависят как от износостойкости, так и от прочности инструмента.

3. Цель исследования. Критериями оптимальности являются также материальные затраты – затраты материалов, прошлого овеществленного труда. Особое значение приобретают некоторые виды затрат в связи с исчерпанием природных ресурсов, например, запасов вольфрама, некоторых видов энергии. В рассматриваемом случае важно учитывать удельный расход R_C твердого сплава как содержащего дефицитные компоненты, а в отдельных случаях и расход комплектов инструмента R_{II} (корпусов, модулей, опор, стружколомов и т.д.).

Сначала можно определить расход пластин твердого сплава:

$$R_{II} = \frac{t_o}{KT}, \frac{um}{m^2}. \quad (15)$$

Отсюда получаем расход твердого сплава R_C и расход инструмента (комплектов блока или модуля, кроме режущих пластин) R_K :

$$R_C = M_{II} R_{II} = \lambda l h b R_{II}, \text{ г/м}^2; \quad (16)$$

$$R_K = \frac{R_{II}}{Z}, \text{ ум/м}^2, \quad (17)$$

Где, M_n – масса пластины, г/шт; γ – удельная масса твердого сплава, г/мм³; l, h, b – соответственно длина, толщина и ширина пластины, мм; Z – число пластин в комплекте.

4. Изложение основного материала. Экономическими критериями служат стоимость собственно обработки, стоимость твердого сплава, стоимость инструмента и другие расходы. Для них установлены следующие показатели (в порядке упоминания): $E_{шт}$; $A_C R_C$; $A_{II} K_{II}$, где E – стоимость станко-часа, A_C – стоимость твердого сплава, A_{II} – стоимость комплекта инструмента (без твердого сплава).

Параметр E может включать только 1-ую группу затрат, пропорциональную трудоемкости обработки: заработную плату станочников, затраты на электроэнергию и вспомогательные материалы или также 2-ую группу: затраты на амортизацию и ремонт основного оборудования, амортизацию и содержание помещения и т.д. В зависимости от того, будет ли E равна 1-ой, 1+2-й или всем группам затрат, денежные затраты будут представлять собой, главным образом, затраты на резание (входящие сюда затраты на инструмент учитывают отдельно) и труд станочников, цеховые расходы или приведенные затраты (в указанных случаях E будет обозначаться соответственно E_1, E_2 и E_3). Стоимость станка оказывает большое влияние на данные затраты, расходуемые на обработку 1 детали. Однако, для экономических расчетов не всегда следует брать полные приведенные затраты, а только

определяющую их группу. Рассмотрим некоторые закономерности для тяжелых токарных станков.

Стоимость станко-часа E с учетом различных групп затрат аппроксимируются уравнением:

$$E = C_e D_C^{0.2} \quad (18)$$

где, C_e – коэффициент, D_C – основной размерный параметр станка.

Стоимость обработки складывается из стоимости процесса резания и стоимости восстановления ТС. Также могут быть разложены и другие элементы денежных затрат. В определенных случаях необходимо учитывать величины оборотных фондов F_0 твердого сплава на рабочем месте:

$$F_0 = M_n Z_n n_B t_{um} / F, \quad (19)$$

Где, Z_n – число запасных пластин одного вида; n_B – число видов пластин; F_0 – эффективный фонд времени работы станка.

В целом затраты на обработку 1 м² поверхности детали составляют:

$$A = E t_{um} + A_C R_C + A_{II} R_{II} + A_0 F_0 \quad (20)$$

В настоящей работе приведены два критерия: напряженность труда станочника и безопасность станочника, связанная со стружкодроблением. Напряженность труда оценивается некоторой безразмерной величиной N_p , отражающей число физических и логических операций, выполняемых в единицу времени. N_p обуславливается физической и психофизиологической нагрузкой.

Для получения значений весомостей критериев и отбора необходимого числа критериев для оптимизации параметров блочно-модульного режущего инструмента и режимов его эксплуатации на стадии проектирования использовались положения теории информации.

Информация – результат выбора, функция отношения числа возможных ответов, до и после её получения. Количество информации можно определить через энтропию. Вначале определялось целесообразное число критериев в ПСК. Если начальная энтропия системы A равна $H(A)$, а после получения информации она составит $H^*(A)$, то внесенная информация J равна:

$$J = H(A) - H^*(A). \quad (21)$$

В этом случае одна система состоит из одного элемента – критерия, который может иметь m состояний (m – балльность шкалы). Требуется найти максимально возможную энтропию сложной системы, объединяющей n статистически независимых систем (n – количество критериев).

Число состояний каждой системы $N = m$. Для каждой системы $H_{max} = \log(m)$. Энтропия сложной системы, объединяющей n статистически независимых систем, равна сумме энтропии этих систем:

$$H_{MAX} = \sum_{i=1}^n \log(m) = n \log(m). \quad (22)$$

Т.к. $H(A) = 0$ (энтропия после получения информации = 0), то количество информации в зависимости от числа критериев:

$$J(n) = n \log(m). \quad (23)$$

Для комплекса статистически независимых систем (критериев) приращение количества информации $\Delta \cdot J$ при увеличении числа критериев равно:

$$\Delta \cdot J = \frac{1}{n+1} \log(m). \quad (24)$$

Здесь Δ - вклад $(n+1)$ критерия в общее количество информации системы.

Количественно величина изменения приращения количества информации оценивается первой производной:

$$(\Delta \cdot J)' = \frac{\log(m)}{(n+1)^2} \quad (25)$$

Из графика (рис. 1) видно, что с увеличением числа критериев, более 7, приращение количества информации резко уменьшается (менее 0.5 %), а при $n > 9$ стремится к нулю. В то же время при малых n ($n < 4$) это приращение велико (более 1 %). С другой стороны, из справочных данных по психофизиологическим и иным возможностям человека следует, что число критериев (свойств, объектов), которое может одновременно охватить человек, составляет 4 ... 7.

Предложенный способ определения количества свойств (критериев) не учитывает их важности. При расположении свойств в ранжированный ряд весомость каждого последующего свойства не превышает весомости предыдущих. С ростом числа свойств весомости, а, следовательно, и количественное влияние на комплексный показатель исследуемого объекта последних критериев ранжированного ряда резко снижаются. Это также свидетельствует о нецелесообразности значительного увеличения числа критериев.

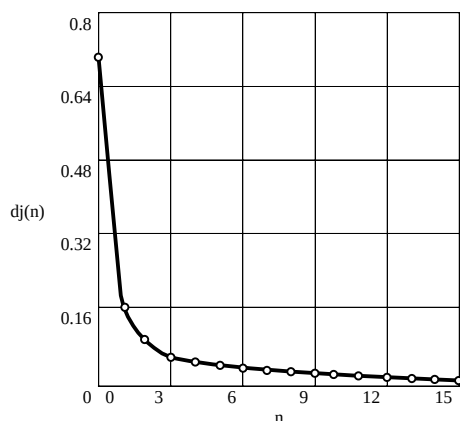


Рис. 1 – Рассчитанная скорость приращения количества информации

Для получения представительного семейства критериев для многокритериальной и многопараметрической оптимизации ПМО предлагается следующая система критериев:

1) Критерий полноты. Использование дополнительных критериев не меняет результаты, а отбрасывание хотя бы одного приводит к изменению результатов.

2) Критерий минимальности. Набор должен содержать как можно меньшее число критериев.

3) Критерий операциональности. Каждый критерий должен иметь понятную формулировку, ясный и однозначный смысл, быть удобным для практических расчетов.

4) Критерий измеримости. Каждый критерий должен допускать возможность количественной оценки.

5) Критерий автономной информативности. Каждый критерий должен содержать возможно больше информации, не исчерпанной информацией, содержащейся в других критериях и не являющейся аддитивной по отношению к последней. Этот критерий имеет особое значение в связи с идеологией многокритериальности.

6) Критерий экономичности. Получение представительного семейства критериев должно требовать минимальных затрат.

Эта система отвечает требованиям логической непротиворечивости, соответствует условиям стоящей задачи, конструктивна и может служить основанием для построения механизма выбора. Она называется далее системой критериев нулевого уровня и используется для определения качественного состава ПСК. Вектор критериев, который формируется, таким образом, существенно сказывается на решении.

Для определения весомостей критериев (ВК) оптимальности режущего инструмента и технологической системы использовались следующие показатели:

1. Информативность - полнота оценки совокупности свойств, составляющих качество модульного инструмента и определяющих эффективность данных критериев;

2. Значимость этого критерия, как для завода-изготовителя, так и для завода-потребителя с точки зрения его влияния на цену инструмента.

Главный принцип, используемый в дальнейшем определении весомости критериев (ВК), состоит в следующем: ценность критерия определяется количеством информации, которая им вносится. Информативность аналитически предлагается определять следующим образом. Количество возможных сообщений n с помощью алфавита из m символов равно. $N = n$. Количество информации, отвечающее требованию аддитивности, обычно принимается равным:

$$J = \log(N) = m \log(n). \quad (26)$$

В качестве m было взято общее число исходных постоянных и управляемых переменных, а в качестве n число постоянных и переменных, используемых в данной целевой функции или целевом функционале, определяющем данный критерий. Этим методом была посчитана информативность критериев оптимальности, используемых при оптимизации параметров тяжелых токарных станков с точки зрения теории информации и полученная весомость была сопоставлена с весомостью, полученной далее методом групповой экспертизы (табл. 3). В

большинстве случаев совпадение оценок оказалось удовлетворительным.

Значимость аналитически предлагается определять как степень влияния данного критерия на интегральный показатель технико-экономической

эффективности $K_{мэ}$ и социально-экологический результат применения оцениваемого объекта $K_{сэ}$, взятых с соответствующими весами: $K_{и} = K_{мэ}B_{мэ} + K_{сэ}B_{сэ}$.

Таблица 3 – Таблица весомостей критериев

Критерий	Число Пар. ЦФ	Весомость, полученная	
		Теоретически	В ходе экспертизы
Приведенные затраты	14	0,213	0,213
Напряженность	8	0,142	0,12
Производительность	8	0,142	0,188
Расход твердого сплава	9	0,156	0,138
Расход инструмента	7	0,114	0,091

Получение уравнения для $K_{и}$ является отдельной, достаточно сложной задачей. Представляется, что наилучшим было бы принять, что $K_{мэ}$ = прибыль. $K_{сэ}$ можно приравнять напряженности труда, предположив, что безопасность труда является ограничением. Вопрос о назначении весомостей $B_{мэ}$ и $B_{сэ}$ может быть решен только эвристически.

Они в значительной степени, как и прибыль, будут зависеть от конъюнктуры рынка, многих технических факторов. Отметим, что значимость в значительной мере определяется рыночной и производственной ситуацией. Предложенный метод ее определения относится к некоторому общему случаю, когда нет явно выраженного дефицита денежных средств, оборудования, материалов, рабочей силы, времени, обуславливающего сроки поставки и так далее.

С использованием критериев нулевого уровня был осуществлен предварительный отбор основных критериев при проектировании и эксплуатации блочно-модульного инструмента для тяжелых токарных станков при заданном качестве обработки и обеспечении стабильного стружкодробления. Для этого использовался метод открытой групповой экспертизы с взаимодействием экспертов. Эксперты являлись ведущими специалистами в области проектирования, изготовления и эксплуатации сборного модульного инструмента и тяжелых станков. Перед экспертами ставилась задача определить весомость предложенных критериев, а при необходимости предложить новые критерии. Предусмотрено было также, что веса критериев будут впоследствии использованы при оптимизации по аддитивной свертке критериев.

После второго тура голосования оценки почти по всем критериям оказались согласованными (коэффициент вариации $W < 0.3$). Были отобраны 9 наиболее важных критериев оптимальности, характеризующих технологическую систему: $t_{шт}$ - штучное время (показатель производительности

обработки, час/м²); A - затраты (показатель экономической эффективности обработки с учетом капитальных вложений) грн/м; P_r - прибыль, %; R_c - расход твердого сплава г/м²; $R_{и}$ - расход комплектов инструмента шт/м²; T_{γ}/T - надежность модульного инструмента (отношение гамма процентной стойкости к среднему периоду стойкости); T_p - трудоемкость изготовления инструмента час/шт; P_c - вероятность стабильного дробления стружки (безопасность рабочего от поражения стружкой, повреждения модульного инструмента и детали). H_p - напряженность, интенсивность труда рабочих (число логических операций в единицу времени);

Первая группа критериев характеризует результат функционирования технологической системы $t_{шт}$ - количественный, A и P - качественный (экономическая эффективность). Большинство основных критериев характеризуют затраты ресурсов на обеспечение функционирования ТСЧ.

Рассмотрим критерий A и с других позиций. Одним из наиболее полных критериев, традиционно считающихся главным, являются приведенные затраты, значение которых в значительной степени зависит от стоимости станко-часа E . Однако, в зависимости от производственной ситуации, значение стоимости станко-часа E для тяжелых токарных станков может изменяться до 10 - 20 раз. Критерии R_c и $R_{и}$ имеют важное значение, так как твердый сплав и модульный инструмент лимитированы из-за содержания дефицитных компонентов и высокой стоимости.

Необходимость выделения в качестве критерия оптимальности надежности инструмента или всей технологической системы в целом в виде показателя T_{γ}/T была обусловлена важностью стабильности обработки на тяжелых станках с ЧПУ, а также при обработке больших поверхностей ответственных деталей. Вместо T_{γ}/T можно использовать связанный с ним показатель - коэффициент вариации

стойкости W . Важным критерием с точки зрения стабильности обработки является P_c - вероятность дробления стружки. Этот критерий особо важен для эксплуатации тяжелых станков с ЧПУ, где

предусмотрена автоматизированная уборка стружки. Сводные результаты экспертизы (средняя оценка весомости критериев B ; и коэффициент вариации W) приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Сводные результаты экспертизы

N п.п.	Критерии оптимальности	Весомость критериев	
		С позиции предприятия изготовителя	С позиции предприятия потребителя
1	A	0,13	0,29
2	t_{um}	0,11	0,24
3	Rc	0,11	0,2
4	Ru	0,08	0,11
5	Hp	0,04	0,1
6	$T\gamma/T$	0,11	0,15
7	T_p	0,09	0,11
8	P_c	0,06	0,12
9	P	0,04	0,11

Рассмотрим результаты экспертизы. Для потребителя главными критериями являются затраты и производительность труда, расход твердого сплава.

Для изготовителя главными критериями являются прибыль, а затраты у потребителя имеют ту же трудоемкость изготовления инструмента. Весомость зависит от уровня иерархии системы. Для цеха, если он не выделен в самостоятельную хозяйственную единицу, затраты имеют меньшее значение. Здесь особо проявляется принцип "производительность любой ценой".

По мере перехода к рыночному хозяйству изменения цен на продукцию и услуги также происходит определенное изменение весомостей. Если ранее на первом месте была производительность, то сейчас - затраты. Роль производительности велика только в том случае, когда имеется много заказов. Обращает на себя внимание примерно одинаковая весомость большого числа критериев, например, вероятность стабильного дробления стружки и надежность модульного инструмента. Обобщая результаты экспертизы, можно сделать следующие выводы:

- для обеспечения максимальной экономии при обработке на тяжелых токарных станках необходимо учитывать все критерии, используемые при оптимизации;
- стабильность обработки на тяжелых станках с ЧПУ может быть получена за счет высокой надежности модульного инструмента и вероятности дробления стружки;
- переход к рыночному хозяйству, изменение цен на твердый сплав и инструмент приводят к определенному изменению весомостей. Если ранее на первом месте была производительность, то в настоящее время это затраты.

Выводы. В результате вероятностной оценки объема сечения срезаемого слоя на тяжелых токарных станках и учета технологически обусловленной степени неадекватности использования длины режущей кромки показано, что на этих станках необходимо иметь широкую номенклатуру твердосплавных пластин, а конструкция инструмента должна быть модульной для быстрой смены инструмента в зависимости от величины срезаемого слоя.

Показано, что на тяжелых станках при черновом и получистовом точении, на экономически целесообразных режимах резания, доля поломок по сечению пластины колеблется от 20% до 40% от всех видов отказов. Анализ структуры отказов позволяет наметить конструктивные и технологические мероприятия по повышению прочности и надежности инструмента.

Процесс резания на тяжелых станках, при котором непосредственно обеспечивается заданная форма детали, ее размеры и качество поверхностного слоя, занимает в среднем около половины времени обработки. Располагая статистическими данными о структуре времени обработки, можно определить вероятность нахождения технологической системы в рабочем или нерабочем состоянии.

Показано, что выбор набора критериев зависит от многих факторов, обуславливающих конкретную производственную ситуацию, вида модульного инструмента, задачи решаемой при оптимизации. Набор для оптимизации системы инструмента и технологической системы должен включать 3 группы критериев: технико-экономические, экономические и связанные с человеком (человеческий фактор).

С помощью теории информации, и в частности, с

использованием энтропийной оценки определено рациональное число критериев оптимальности, которое не должно быть более семи, и их эффективность. Для оптимизации параметров технологической системы была проведена экспертная оценка, учитывающая различные условия производства, как с позиции предприятия изготовителя, так и с позиции предприятия потребителя. Приняты следующие группы критериев и функциональных ограничений для условий черновой и получистовой обработки на тяжелых станках - приведенные затраты, производительность, расход твердого сплава, расход комплектов блочно-модульного инструмента, вероятность стабильного дробления стружки.

Список литературы:

1. Грабченко А.И. *Системные принципы создания агрегатно-модульного инструмента и оптимизации рабочего процесса* [Текст] / А.И. Грабченко, Е.В. Мироненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн. – техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. – Вып. 64. – С. 47 – 52.: ил.
2. Кравцов А.Н. *Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов на основе системной оптимизации* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева) (С. 122 – 141).
3. Тисенко В.Н. *Инструментальные средства менеджмента* [Текст] / В.Н. Тисенко [и др.]; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур); – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 217 с.
4. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей с применением функционально-стоимостного анализа при многокритериальной регламентации параметров их поверхностного слоя* [Текст] / А.Н. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева) (С. 189 – 201).
5. Митрофанов В.Г. *Моделирование и управление движениями формообразования при механической обработке* [Текст] / Митрофанов В.Г. [и др.]; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур); – Ирбит: ОНИКС, 2011 – 239 с. (Сер.: «Автоматизированное проектирование и автоматизация производственных процессов» / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева)
6. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей с применением функционально-стоимостного анализа при многокритериальной регламентации параметров их поверхностного слоя* [Текст] / А.Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – Краматорск, вып. №31, 2012. – 276 с.
7. Крамарь В.А. *Вопросы прикладной математики в проектировании и автоматизации производственных процессов: Учебн. Пособие* [Текст] / В.А. Крамарь, О.И. Драчев, А.Н. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Ирбит: Оникс, 2011. – 176 с.
8. Кравцов А.Н. *Эксплуатационные свойства поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов и их обеспечение* [Текст] / А.Н. Кравцов // Вестник НТУУ «Киевский

Блочно-модульный принцип построения компоновки инструмента наиболее эффективен для тяжелых токарных станков, где в основном применяются инструменты, имеющие большие габариты $H \times B \times L = 80 \times 80 \times 1000$ мм и массу более 15 кг, что делает трудоемким смену и переналадку инструмента на новую операцию. Блочно-модульный принцип компоновки, с относительно ограниченным комплектом модулей, позволяет создавать без серьезных дополнительных затрат широкую номенклатуру систем инструмента, наиболее приспособленных к конкретным требованиям производства

- политехнический институт»: Машиностроение. № 66, 2012 (с. 56 – 62).
10. Кравцов Н.В. *Комплексные параметры состояния поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов* [Текст] / Н.В. Кравцов, А.Н. Кравцов // Журнал «Омский научный вестник». Серия: Приборы, машины и технологии. № 3 (113). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012 (с. 162 – 166).
11. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей при изготовлении* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 267 с.
12. Кравцов А.Н. *Геометрическое моделирование взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов с их показателями качества при помощи теории графов* [Текст] / А.Н. Кравцов // Журнал "Вектор науки ТГУ". № 3 (21), 2012 (с. 89 – 93).
13. Кравцов А.Н. *Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей блочно-модульных токарных резцов* [Текст] / А.Н. Кравцов // Журнал "Вектор науки ТГУ". № 2 (20), 2012 (с. 33 – 37).
14. Кравцов А.Н. *Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин* [Текст] / А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; науч. ред. О.И. Драчев; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) – Изд. 2-е, испр., перераб. и доп. – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 293 с.: ил., табл.; – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев).

References (transliterated)

1. Grabchenko A.I. *Sistemny`e principy` sozdaniya agregatno-modul'nogo instrumenta i optimizacii` rabocheho proczessa* [Tekst] / A.I. Grabchenko, E.V. Mironenko // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – Mezhd. nauchn. – tekhn. sbornik. – Khar'kov: NTU «KhPI». 2003. – Vy`p. 64. – S. 47 – 52.: il.
2. Kravczov A.N. *Modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya proizvodstvenno-tekhnicheskikh kharakteristik blochno-modul'ny`kh instrumentov na osnove sistemnoj optimizacii`* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov // Problemy` proektirovaniya i avtomatizacii` mashinostroitel'ny`kh proizvodstv: sbornik nauchny`kh trudov. – Volgograd: VolgGTU, Tol'yatti: Irbit: ZAO «ONIKS», 2013. – 208 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh proczessov v mashinostroenii / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva) (S. 122 – 141).
3. Tisenco V.N. *Instrumental'ny`e sredstva menedzhmenta* [Tekst] / V.N. Tisenco [i dr.]; Zakry'toe akczionerhoe ob-vo «ONIKS» (Ob-nie nauch., inzhenerny`kh i kommercheskikh struktur); – Tol'yatti: ZAO «ONIKS», 2012 – 217 s.
4. Kravczov A.N. *Obespechenie e`kspluataczionny`kh svojstv poverkhnostej detalej s primeneniem funkczional'no-stoimostnogo analiza pri mnogokriterial'noj reglamentaczii` parametrov ikh poverkhnostnogo sloya* [Tekst] / A.N. Kravczov // Problemy` proektirovaniya i avtomatizacii` mashinostroitel'ny`kh proizvodstv:

- sbornik nauchnykh trudov. – Volgograd: VolgGTU, Tol'yatti: Irbit: ZAO «ONIKS», 2013. – 208 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva) (S. 189 – 201).
5. Mitrofanov V.G. *Modelirovanie i upravlenie dvizheniyami formobrazovaniya pri mekhanicheskoy obrabotke* [Tekst] / Mitrofanov V.G. [i dr.]; Zakry'toe akczionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur); – Irbit: ONIKS, 2011 – 239 s. (Ser.: «Avtomatizirovanoe proektirovanie i avtomatizaciya proizvodstvenny'kh protsessov» / Pod obshh. red. Yu.M. Solomenczeva)
 6. Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluataczionny'kh svojstv poverkhnostej detalej s primeneniem funkcziional'no-stoimostnogo analiza pri mnogokriterial'noj reglamentaczii parametrov ikh poverkhnostnogo sloya* [Tekst] / A.N. Kravczov // Nadezhnost' instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem. Sbornik nauchny'kh trudov. – Kramatorsk, vy'p. #31, 2012. – 276 s.
 7. Kramar' V.A. *Voprosy' prikladnoj matematiki v proektirovanii i avtomatizaczii proizvodstvenny'kh protsessov: Uchebn. Posobie* [Tekst] / V.A. Kramar', O.I. Drachyov, A.N. Kravczov; Zakry'toe akczionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur). – Irbit: Oniks, 2011. – 176 s.
 8. Kravczov A.N. *E'kspluataczionny'e svojstva poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov i ikh obespechenie* [Tekst] / A.N. Kravczov // Vestnik NTUU «Kievskij politekhnicheskij institut»: Mashinostroenie. # 66, 2012 (s. 56 – 62).
 9. Kravczov N.V. *Kompleksny'e parametry' sostoyaniya poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov* [Tekst] / N.V. Kravczov, A.N. Kravczov // Zhurnal «Omskij nauchny'j vestnik». Seriya: Pribory, mashiny i tekhnologii. # 3 (113). – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2012 (s. 162 – 166).
 10. Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluataczionny'kh svojstv poverkhnostej detalej pri izgotovlenii* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov; Zakry'toe akczionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur) – Irbit: ONIKS, 2011. – 267 s.
 11. Kravczov A.N. *Geometricheskoe modelirovanie vzaimosvyazi e'kspluataczionny'kh svojstv poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov s ikh pokazatelyami kachestva pri pomoshhi teorii grafov* [Tekst] / A.N. Kravczov // Zhurnal "Vektor nauki TGU". # 3 (21), 2012 (s. 89 – 93).
 12. Kravczov A.N. *Obespechenie e'kspluataczionny'kh svojstv poverkhnostej detalej blochno-modul'ny'kh tokarny'kh rezcov* [Tekst] / A.N. Kravczov // Zhurnal "Vektor nauki TGU". # 2 (20), 2012 (s. 33 – 37).
 13. Kravczov A.N. *Modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluataczionny'kh svojstv poverkhnostej detalej mashin* [Tekst] / A.N. Kravczov, N.V. Kravczov; nauch. red. O.I. Drachev; Zakry'toe akczionernoe ob-vo "ONIKS" (Ob-nie nauch., inzhenerny'kh i kommercheskikh struktur) – Izd. 2–e, ispr., pererab. i dop. – Tol'yatti: ZAO "ONIKS", 2012 – 293 s.: il., tabl.; – (Seriya: Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / obshh. red. Yu.M. Solomenczev)

Поступила (received) 02.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Галина Петрівна (Клименко Галина Петровна, Klimenko Galina Petrovna) – завід. кафедри, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050) 219 8511; Email: msi@dgma.donetsk.ua;

Мироненко Євген Васильович (Мироненко Евгений Васильевич, Mironenko Evgeny Vasilyevich) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050) -604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

Фадєєв Валерій Андрійович (Фадеев Валерий Андреевич, Fadeev Valery Andreevich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків, тел.: (067) 570-5810;

Заковоротний Олександр Юрійович (Заковоротный Александр Юрьевич, Zakovorotniy Alexander Yuryevich) – доктор технічних наук, професор кафедри обчислювальна техніка та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків, тел.: (097) 967-3271;; e-mail: arcade@i.ua;

Ищенко Григорій Іванович (Ищенко Григорий Иванович, Ischenko Grigory Ivanovich) – головний інженер ПАТ «Турбоатом», м. Харків, тел.: +38 (057) 759-96-03

БЕРЕЗУЦЬКИЙ В.В., ІЛЬІНСЬКА О.І.**НОВІТНІ ПІДХОДИ ДО ВТІЛЕННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ТА
УДОСКОНАЛЕННЯ ІНСТРУКЦІЙ З ОХОРОНИ ПРАЦІ**

Розглянуто новітні підходи щодо розробки інструкцій з охорони праці, на заміну тим, які існують вже багато років, та жодного разу не враховували зміни у нормативах та законодавчих документах. Показано що за останні 20 років докорінно змінилася законодавча база України та підприємства набули більшої самостійності, а разом з тим підприємства стали більше уваги приділяти Євроінтеграції та прагнути відповідності світовим стандартам, які спрямовано на використання ризик-орієнтованих технологій. Визначено, що методики складання інструкцій не враховують світові ризик-орієнтовані стандарти, тому що методика складання їх застаріла та має дуже спрощений вигляд. Пропонується нова форма інструкції з охорони праці для працівників на робочому місці, яка відповідає новітнім підходам в управлінні професійною безпекою та базується на ризик-орієнтованому підході. Запропоновано нову форму інструкції з охорони праці, що вміщує дані по оцінці професійних ризиків. Обґрунтовано переваги запропонованої форми інструкції, яка враховує вимоги стандарту ISO 12000 та враховує попередні види інструкцій, тобто, наводить небезпечні та шкідливі чинники на робочому місці та заходи, які необхідно передбачити задля їх усунення або захисту працівників. Знайдено та показано методологію визначення ризиків та їх якісних та кількісних показників у форматі інструкції, зробив це таким чином, що дозволяє заповнювати інструкцію у електронному вигляді, як шаблон та контролювати поточні зміни у технологіях та на робочому місці працівника. Розроблено форму карти ризику, яка є додатком до інструкції, що є необхідним документом з безпеки та гігієни праці на кожному сучасному підприємстві. Розроблено методику порівняння показників ризику, які мають технічний характер із гігієнічними, яким не приділялось достатньо уваги до цього. Наведено рекомендації по методам оцінки ризиків та по відповідності рівнів ризиків до гігієнічної класифікації умов праці, яка застосовується в системі охорони праці в Україні. Наведено приклад старої та нової форми інструкцій з охорони праці та карта ризику для робочого місця фрезерувальника.

Ключові слова: ризик, ризик орієнтований підхід, оцінка ризику, інструкції, безпека праці, професійний ризик, ідентифікація ризиків, умови праці.

БЕРЕЗУЦЬКИЙ В.В., ІЛЬІНСКАЯ О.И.**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВОПЛОЩЕНИЮ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА И
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУКЦИИ ПО ОХРАНЕ ТРУДА**

Рассмотрены новейшие подходы к разработке инструкций по охране труда, на замену тем, которые существуют уже много лет, и ни разу не учитывали изменения в нормативах и законодательных документах. Показано что за последние 20 лет в корне изменилась законодательная база Украины и предприятия получили большую самостоятельность, и вместе с тем предприятия стали больше внимания уделять евроинтеграции и стремиться соответствовать мировым стандартам, направленным на использование риск-ориентированных технологий. Выявлено, что методики составления инструкций не учитывают мировые риск-ориентированные стандарты, так как методика составления их устарела и имеет очень упрощенный вид. Предлагается новая форма инструкции по охране труда для работников на рабочем месте, соответствующая новейшим подходам в управлении профессиональной безопасностью и базируется на риск-ориентированный подход. Предложена новая форма инструкции по охране труда, которая содержит данные по оценке профессиональных рисков. Обоснованы преимущества предлагаемой формы инструкции, которая учитывает требования стандарта ISO 12000 и учитывает предыдущие виды инструкций, то есть, приводит опасные и вредные факторы на рабочем месте и меры, которые необходимо предусмотреть для их устранения или защиты работников. Найдено и показано методологию определения рисков и их качественных и количественных показателей в формате инструкции, сделано это таким образом, что позволяет заполнять инструкцию в электронном виде, как шаблон и контролировать текущие изменения в технологиях и на рабочем месте работника. Разработана форма карты риска, которая является приложением к инструкции и является необходимым документом по безопасности и гигиене труда на каждом современном предприятии. Разработана методика сравнения показателей риска, носят технический характер с гигиеническими, которым не уделялось достаточно внимания к этому. Приведены рекомендации по методам оценки рисков и по соответствию уровней рисков гигиенической классификации условий труда, применяемой в системе охраны труда в Украине. Приведён пример старой и новой формы инструкций по охране труда и карты риска для рабочего места фрезеровщика.

Ключевые слова: риск, риск-ориентированный подход, оценка риска, инструкции, безопасность труда, профессиональный риск, идентификация рисков, условия труда.

BEREZUTSKYI V.V., ILINSKA O.I.**MODERN APPROACHES TO THE IMPLEMENTATION OF RISK-ORIENTED APPROACH AND IMPROVEMENT OF
OCCUPATIONAL SAFETY INSTRUCTIONS**

The latest approaches to the development of labor protection instructions are considered, to replace those that have existed for many years, and have never taken into account changes in standards and legislative documents. It is shown that over the past 20 years, the legislative framework of Ukraine has radically changed and enterprises have gained greater independence, and at the same time, enterprises have begun to pay more attention to European integration and strive to meet international standards aimed at using risk-oriented technologies. It was revealed that the methods for compiling instructions do not take into account global risk-oriented standards, since the methodology for compiling them is outdated and has a very simplified form. A new form of instructions on labor protection for workers at the workplace is proposed, which corresponds to the latest approaches in occupational safety management and is based on a risk-based approach. A new form of instructions for labor protection is proposed, which contains data on the assessment of occupational risks. The advantages of the proposed form of instruction are substantiated, which takes into account the requirements of the ISO 12000 standard and takes into account the previous types of instructions, that is, cites dangerous and harmful factors at the workplace and measures that must be taken to eliminate or protect workers. A methodology for identifying risks and their qualitative and quantitative indicators in the format of the instructions was found and shown. This is done in such a way that allows you to fill out the instructions electronically as a template and monitor the current changes in the technologies and at the workplace of the employee. A risk map form has been developed, which is an annex to the instructions and is a necessary document on safety and health at every modern enterprise. A technique has been developed for comparing risk indicators; they are of a technical nature with hygiene ones, which did not receive enough attention to this. Recommendations are given on risk assessment methods and on the correspondence of risk levels to the hygienic classification of working conditions used in the labor protection system in Ukraine. An example of the old and new form of labor protection instructions and a risk map for the milling workplace is given.

Key words: risk, risk-based approach, risk assessment, instructions, labor safety, occupational risk, risk identification, working conditions.

Вступ. На теперішній час світова тенденція безпеки, зорієнтована на питання гігієнічної безпеки, як наслідок вірусної атаки COVID-19 у 2019-2020 роках. Необхідні нові підходи у вирішенні питань з безпеки праці.

Професійне захворювання лікарів - захворювання на COVID-19, та на інші інфекційні захворювання мали такий розмах та катастрофічні наслідки, бо відбувалось порушення норм та правил з безпеки праці та гігієнічних нормативів на робочому місці. Тому пошуки новітніх підходів, щодо розробки інструкцій з охорони праці, на заміну тим, які існують вже багато років, та не враховують зміни у нормативах та законодавчих документах, є актуальною задачею. За останні 20 років докорінно змінилася законодавча база України, підприємства набули більшої самостійності, та разом з тим підприємства стали більше уваги приділяти Євроінтеграції та прагненню відповідності діяльності підприємств, у тому числі із питань безпеки, світовим стандартам, які базуються на ризик-орієнтованих технологіях. Методики за якими розробляються інструкції, не враховують ризики, а зміст інструкцій застарілий та має спрощений вигляд. Тому, настав час, для розробки нових форм та надання нового змісту інструкції з охорони праці для працівників на робочому місці. Оновлені інструкції мають відповідати новітнім підходам, які набули чинності на підприємствах в управлінні професійною безпекою та базується на ризик-орієнтованому підході. Нова форма інструкції з охорони праці, вміщує дані щодо оцінці професійних ризиків, враховує вимоги стандартів (ДСТУ ISO 12000 та ДСТУ ISO 31000 та інших), враховує попередні види інструкцій та наводить небезпечні та шкідливі чинники на робочому місці, заходи, які необхідно передбачити задля їх усунення або захисту працівників для запобігання дії небезпек. Методологія визначення ризиків та їх якісних та кількісних показників у форматі інструкції, розроблено таким чином, що дозволяє заповнювати інструкцію у електронному вигляді та використовувати її як шаблон, контролювати поточні зміни у технологіях та на робочому місці працівника. Дуже важливим завданням є втілення карт ризиків на підприємствах. Правильним буде коли карта ризиків не відривається від інструкції з охорони праці. Це надає можливість працівнику водночас знайомитись та вивчати інструкцію та у скороченому вигляді вивчати ризики, яким він піддається виконуючи виробничі завдання. Треба розробити таку форму карти ризику, яка стане додатком до інструкції, та буде необхідним документом з безпеки та гігієни праці на кожному сучасному підприємстві. Існуючи показники ризиків націлено на ризики, які мають технічний характер - обладнання, інструмент тощо, а треба узагальнити усі існуючі ризики на робочому місці, у тому числі і гігієнічні.

Аналіз стану питання. Сучасні підходи до вирішення питань щодо забезпечення безпечних умов

праці не можливо успішно вирішувати без урахування того, що в країні впроваджується ризик-орієнтований підхід в керуванні підприємствами. Ризик-орієнтований підхід (РОП) впроваджується відповідно до стандартів ДСТУ OHSAS 18000, ДСТУ ISO 31000, ДСТУ ISO 12000 та інших.

Неможливо виключити всі ризики на робочих місцях, але можна направити зусилля по зниженню ризиків, які є суттєвими, крім того краще переконатися, що витрати, час і зусилля, необхідні для зниження ризику, не є надмірно непропорційними отриманої вигоди. Ці тези витікають з досвіду впровадження ризик-орієнтованого підходу у Європейських країнах. [1].

Інновації в галузі безпеки та гігієни праці, зокрема впровадження РОП, забезпечують сталий розвиток завдяки здоровим людям, більш безпечним робочих місць, зниження витрат на нещасні випадки, контрольованому середовищі, нещасних випадків на керованих робочих місцях і поліпшенню знань про безпеку на робочому місці [2].

При втіленні РОП в Україні необхідно максимально ефективно використати добутки України в сфері професійної безпеки, знайти відповідності елементів вітчизняної системи охорони праці до впроваджуваної РОП. Це дозволить зекономити час та ресурси на сам процес впровадження нового підходу та дозволить прискорити його використання.

Було знайдено мало досліджень, що стосуються знаходження відповідності вітчизняних інструментів ОП до використовуваних в світі РОП, наприклад в питанні офіційних документів по інструктажах з техніки безпеки на робочому місці.

Впровадження та використання РОП складається з наступних етапів: ідентифікація ризиків, оцінювання та «франжування» ризиків, визначення превентивних заходів, вживання заходів, моніторинг та перевірка [3,4,5].

Особливістю втілення міжнародних стандартів в Україні є те, що ідентифікацію небезпек, що є одним з базових аспектів при впровадженні РОП на усіх підприємствах, вже виконали при розробці інструкції з охорони праці. На сучасному етапі, при впровадженні РОП, ці інструкції необхідно привести до відповідності вимогам РОП, тобто привести ризики у якісному та кількісному вигляді, показати їх рівні та найбільш небезпечні етапи виробничого процесу, згідно ризикам. Треба ввести додаток до інструкції з охорони праці у вигляді карти-ризиків.

Аналіз основних досягнень і літератури.

Величину ризиків можна встановити виходячи з інформації по атестації робочих місць, які вже виконані на підприємстві та визначених в ході атестації шкідливих та небезпечних факторів [6]. Тобто етап оцінювання ризиків в вітчизняній СУОП теж проводився.

В Україні згідно законодавства, працівника має бути попереджено про шкідливі та небезпечні фактори на його робочому місці. Ці дані мають бути висвітлені в інструкції з охорони праці (ОП), яку

мають розробляти безпосередньо керівники робіт для своїх підлеглих [7]. Так як інструкції складаються згідно з [7] з розділів: «Загальні положення», «Вимоги безпеки перед початком роботи», «Вимоги безпеки під час роботи», «Вимоги безпеки після закінчення роботи», «Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях» доцільно розташовувати дані щодо ризиків які діють саме на даних етапах робіт біля тексту інструкції у вигляді таблиці, яка містить дані про причину виникнення, наслідки, рівень ризику та заходи захисту. Також доцільно, у якості додатку до інструкції додавати карту ризику для даного робочого місця.

Інструкція з ОП це є обов'язковий нормативний документ, з яким ознайомлюється кожен працівник перед початком роботи. В інструкціях зазначаються загальні положення щодо охорони праці, організаційні та технічні вимоги безпеки, які визначаються на основі:

- наявних і ймовірних небезпек, які потенційно можуть призвести до травмування, погіршення стану здоров'я чи смерті людини під час трудової діяльності, завдати шкоди майну або навколишньому середовищу;

- вимог безпеки до технологічного процесу, виробничого устаткування, інструментів і пристроїв, що застосовуються під час виконання відповідних робіт, а також вимог безпеки, що містяться в експлуатаційній та ремонтній документації і в технологічному регламенті;

- виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для конкретної професії (конкретного виду робіт) як при

нормальному проходженні технологічного процесу, так і при відхиленнях від оптимального режиму, визначення заходів та засобів захисту від них, вивчення конструктивних й експлуатаційних особливостей та ефективності використання цих засобів;

- аналізу обставин і причин найбільш ймовірних аварійних ситуацій, нещасних випадків і професійних захворювань, характерних для конкретної професії (конкретного виду робіт) та інше.

Усі вище наведені чинники є відправною точкою, щодо визначення ризиків але жодного рівня ризику у інструкціях не вимагають наводити, що є неприпустимим у теперішніх умовах господарювання.

Існуючі методи розв'язання задач.

Оцінювання рівнів ризиків за фізичними, хімічними, біологічними факторами та показниками трудового процесу можна здійснювати за прийнятою і діючою в Україні «Гігієнічною класифікацією праці» [8]. Запропонована таблиця відповідності гігієнічної класифікації умов праці [8, 9] та рівням ризику наведена у таблиці 1. Як видно з таблиці величина професійних ризиків має 7 рівнів від Н1 Дуже малий ризик до Н7 Надвисокий ризик. Виходячи з наявності в Україні прийнятої «Гігієнічної класифікації праці» та зручності її використання (і в РОП в ОП) всі інші професійні ризики, які не входять в «Гігієнічну класифікацію» слід теж оцінювати або приводити до системи оцінки ризиків з сьома рівнями. Також у таблиці 1 зазначено графу по етапу управління ризиками «Терміновість заходів щодо зниження ризику». Інформацію з цієї графи теж потрібно наводити в інструкції з ОП.

Таблиця 1 – Відповідність рівнів ризиків до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу

Умови праці, згідно Гігієнічної класифікації праці [9]		Величина професійного ризику	Терміновість заходів щодо зниження ризику
1 клас – ОПТИМАЛЬНИ		Н1 Ризик дуже малий	Заходи не потрібні, необхідно спостереження
2 клас – ДОПУСТИМИ		Н2 Ризик малий (терпимий)	Заходи не потрібні, але вразливі особи потребують додаткового захисту, необхідне контролювати
3 клас - ШКІДЛИВИ	Шкідливі 1 ступінь (3.1)	Н3 Малий (помірний) ризик	Потрібні заходи щодо зниження ризику, необхідно контролювати
	Шкідливі 2 ступінь (3.2)	Н4 Середній (істотний) ризик	Потрібні заходи щодо зниження ризику в установлені терміни, контроль обов'язковий
	Шкідливі 3 ступінь (3.3)	Н5 Високий (нестерпний) ризик	Потрібні невідкладні заходи щодо зниження ризику в установлені терміни, контроль за рівнями шкідливості
	Шкідливі 4 ступінь (3.4)	Н6 Дуже високий (неприпустимий) ризик	Роботи не можна починати або продовжувати доки не буде зниження ризику, наявність контролю обов'язково
4 клас – НЕБЕЗПЕЧНИ (ЕКСТРЕМАЛЬНИ)		Н7 Надвисокий ризик і ризик для життя, властивий даній професії	Роботи виконуються згідно зі спеціальним регламентом

Мета роботи. Розробити інструкцію з охорони праці, яка враховує сучасні зміни у вітчизняній та світовій нормативній та законодавчій базі із застосуванням ризик-орієнтованих підходів.

Постановка задач. Зробити аналіз методики складання інструкцій з охорони праці на прикладі інструкції з охорони праці на робочому місці фрезерувальника.

Виконати аналіз інструкції фрезерувальника відповідно до рівня ризиків.

Розробити нову форму та зміст інструкції, з інтеграцією показників, як застосовувались раніш та новітніх показників ризиків.

Розробити узагальнений показник ризику, який враховує технічні та гігієнічні ризики.

Зробити аналіз карт ризиків, які використовуються та запропонувати нову, як додаток до інструкції з охорони праці.

Методи дослідження:

- аналіз науково-технічної літератури, джерел інформації з використанням сучасних інформаційних технологій;

- ймовірний аналіз та методи розрахунків ризиків на робочих місцях згідно стандартам ДСТУ ISO12100 [10] та ДСТУ ISO 31000 [11];

- дослідження змісту інструкцій за правилами складання інструкції на робочому місці згідно наказу Мінсоцполітики від 30.03.2017 N 526 "Про внесення

змін до Положення про розробку інструкцій з охорони праці [12] та НПАОП-0.00-4.15-98 [7]

При використанні РОП треба враховувати різні підходи у оцінці ризиків, які пов'язані з видами небезпечних та шкідливих факторів. Виникає завдання зведення різних ризиків до єдиної методології ідентифікації та порівняння. На рис. 1 наведена схема, яка показує, що усі ризики мають єдиний загальний показник - наслідки, до яких можна прив'язувати усі ризики.

Використовуючи наведену вище схему зв'язку ризиків, можна зробити таблицю відповідності ризиків, виходячи із того, як цій ризик буде позначатися у результаті дії того або іншого фактору.

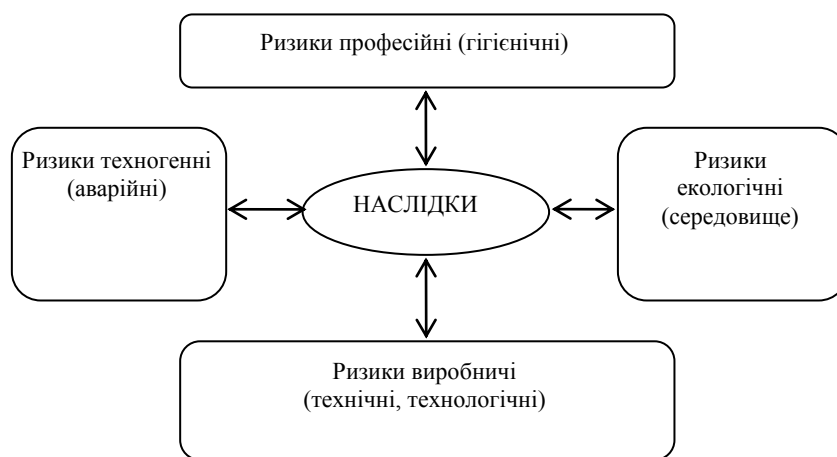


Рис.1 – Зв'язок різних ризиків через наслідки

У нашому варіанті, вивчаються наслідки негативного впливу факторів виробничого середовища, які можуть призвести: до погіршення стану здоров'я (тимчасове, на короткий час, на тривалий час), поранення з втратою працездатності (тимчасове, на короткий час, на тривалий час), загибель працівника (одного, двох або більше 2-х працівників). Необхідно відзначити, що тимчасова втрата працездатності - одна доба (ризик невеликий), на короткий час - до 3 - діб (ризик середній), тривалий час - більш 3діб (ризик високий). Звісно, що ризик загибелі працівника є вкрай високим ризиком. Усі ці

відтінки ризиків необхідно враховувати при визначенні ризиків. Окрім цього, необхідно враховувати ймовірність події. Але зважаючи на те, що ймовірність події дуже сильно пов'язана з людським фактором, то у попередніх розрахунках краще прийняти її, як у методі Файн-Кіні - ймовірною (тобто ≈ 1). У методі Файн-Кіні нема визначення ризику - надвисокий але узагальнюючи ризики, необхідно його врахувати. Надвисоким у професійної діяльності, можна вважати ризик із можливою загибеллю більш як однієї людини, а також при ймовірності такої події рівної 1.

Таблиця 2 – Таблиця узгодження величин професійних ризиків визначених за методом Файн-Кіні та ризиків згідно гігієнічної класифікації умов праці

Величина професійного ризику (згідно Гігієнічної класифікації умов праці) R_h		Узагальнений ризик R_g		Величина професійного ризику (технічний) (за методом Файн - Кіні) R_t
Н 1 Ризик дуже малий		G 1. Ризик дуже малий		Т 1 Ризик дуже малий
Н 2 Ризик малий (терпимий)		G 2. Ризик малий		Т 2. Невеликий
Н 3 Малий (помірний) ризик		G 3. Ризик невеликий		Т 3.Ризик середній
Н 4 Середній (істотний) ризик		G 4. Ризик середній		Т 4.Ризик високий
Н 5 Високий (нестерпний) ризик		G 5. Ризик високий		Т 5.Ризик високий
Н 6 Дуже високий (неприпустимий) ризик		G 6. Ризик вкрай високий		
Н 7 Надвисокий ризик і ризик для життя, властивий даній професії		G7. Ризик надвисокий		

Дані про ідентифіковані ризики та величини ризиків заносяться до карт ризиків.

При розрахунках та заповненні карти ризиків, враховуються усі ризики, але у карту ризиків заноситься ризик з максимальною небезпекою для життя та здоров'я працівників. Тому, якщо отримані результати показують по Rh – малий ризик, а по Rt – ризик вкрай високий, то узагальнений ризик Rg буде ризик вкрай високий.

Якщо величина професійного ризику за Файн-Кіні буде Т 4. Ризик високий то це відповідатиме узагальненому ризику G 6. Ризик вкрай високий.

Карта ризику це інструмент візуалізації інформації, що застосовується у ризик-менеджменті. Вона будується на основі наявних ризиків і їх якісних і кількісних характеристик, отриманих в процесі ідентифікації та оцінювання.

Карта професійних ризиків залежно від форми встановленої на підприємстві може містити такі відомості, як дані, щодо робочого місця та працівників, перелік ризиків, рівень ризику, який оцінено згідно затвердженої методики, заходи щодо зниження рівня ризику, дані щодо можливих джерел небезпеки (обладнання, технологічний процес, сировина, матеріали, готова продукція), вірогідність та наслідки реалізації небезпеки, дані щодо першочерговості виконання заходів щодо зниження безпеки, дані моніторингу ризиків. Всі ці дані мають використовуватись при складанні та перегляді інструкцій з ОП, але не всі дані карт ризику представлені в сучасних інструкціях. Наведення більш повної інформації про ризики, використання та наведення як додатків карт ризиків в інструкціях зробило б інструкції з ОП більш наочними, відображаючими не тільки якісний склад ризиків, а і кількісний. Це надасть більш повну картину про небезпечні виробничі фактори та збільшить мотивацію працівника до безпечної праці.

Інструкція з охорони праці на робочому місці фрезерувальника

Розглянемо, як приклад існуючу інструкцію з охорони праці при роботі на фрезерному верстаті. [14]

1. Загальні положення

1.1. Дана інструкція розроблена у відповідності з НПА ОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями», яке затверджено Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 грудня 2013 року № 966 [13] та діє при роботі на фрезерних верстатах у всіх підрозділах університету.

1.2. До роботи на токарному верстаті допускаються:

- особи не молодше 18 років, що пройшли спеціальне навчання;
- проінструктовані з питань охорони праці і після перевірки їхніх знань конструкції верстату, приладів, інструменту.

1.3. При роботі на фрезерному верстаті можливий вплив на працівників наступних небезпечних виробничих факторів:

- травмуванню очей стружкою при роботі без захисних окулярів;
- поранення рук обертовими частинами верстата, оброблюваної деталі або фрезою;
- намотування одягу або волосся на рухомі деталі (на обертову оправку фрези);
- можливість ураження електричним струмом;
- механічні uszkodження рухомими частинами верстатів.

1.4. Робоче місце повинне бути добре освітленим, підтримуватися в чистоті, не захащуватися сторонніми предметами і речами.

1.5. Роботу треба виконувати стоячи.

1.6. Робітник, який виконує роботу на фрезерному верстаті зобов'язаний бути у спецодязі і захисних окулярах.

1.7. На підлозі біля верстата повинна бути дерев'яна решітка з діелектричним гумовим килимком.

1.8. У процесі роботи на верстаті працівник зобов'язаний дотримуватися правил носіння спецодягу, користування засобами індивідуального захисту, правил особистої гігієни.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Одягнути та привести до ладу робочий одяг: застібнути на гудзики обшлага рукавів або стягнути їх гумкою, заправити одяг так, щоб не було вільних кінців, волосся ретельно заправити під берет (шапочку). Надіти захисні окуляри.

2.2. Підготувати робоче місце, виділивши все, що заважає роботі. Провести зовнішній огляд верстата і переконатися в його справності. Робота на несправному верстаті забороняється.

2.3. Перевірити наявність і надійність кріплення захисних огорожень і з'єднань захисного заземлення з корпусом верстата.

2.4. Відрегулювати освітлення верстату так, щоб робоча зона була достатньо освітлена і світло не засліплювало очей.

2.5. Міцно закріпити різець і оброблювану деталь, вийняти ключ з патрона і покласти його на встановлене місце.

2.6. Перед включенням верстату впевнитися, що його пуск нікому не загрожує.

2.7. Перевірити роботу верстата на холостому ходу.

3. Вимоги безпеки під час виконання роботи

3.1. Для захисту очей від шматків, котрі відлітають, користуватися захисними окулярами. Не нахилити голову близько до фрези або рухомої деталі.

3.2. Перед установленням фрези необхідно перевіряти цілісність та правильність заточування пластин. Пластини повинні бути без викришених місць, тріщин, припикання. Різальний інструмент не повинен мати залуплених кромки.

3.3. Для установлення фрез на верстаті або їх заміни необхідно застосовувати спеціальні пристосування, як ізапобігають порізу рук працівника.

3.4. При установленні фрез на оправку їхні зуби необхідно розмішувати в шаховому порядку.

3.5. Для підтримування фрези під час вибивання її зі шпинделя необхідно застосовувати еластичні прокладки. Не дозволяється підтримувати фрезу рукою без відповідних засобів індивідуального захисту рук.

3.6. Фрезерну оправку або фрезу необхідно закріплювати в шпинделі ключем тільки після ввімкнення коробки швидкостей для запобігання провертанню шпинделя. Не дозволяється затискувати та відтискувати фрезу ключем на оправці ввімкненням електродвигуна, а також залишати ключ на головці затяжного болта після установлення фрези або оправки.

3.7. Після установлення та закріплення фрези необхідно перевіряти її радіальне та торцеве биття, яке не повинно перевищувати 0,1 мм.

3.8. При швидкохідному фрезеруванні необхідно застосовувати огороження та пристосування для уловлювання та видалення стружки (спеціальні стружкові відвідники, прозорі екрани).

3.9. Оброблювані деталі та пристосування, особливо базові та кріпильні поверхні, що прилягають одна до одної, і перед установленням на верстат необхідно очищувати від стружки та мастила для забезпечення правильного установлення їх та досягнення міцності закріплення.

3.10. Отвір шпинделя, хвостовик оправки або фрези, поверхню перехідної втулки перед установленням у шпиндель необхідно очищувати та протирати, забоїни - усувати. При встановленні хвостовика інструменту в отвір шпинделя хвостовик повинен сідати щільно, без люфту.

3.11. Оброблювану деталь необхідно закріплювати в місцях, що розташовані якомога ближче до оброблюваної поверхні. Для закріплення деталей до необроблених поверхонь необхідно застосовувати лещата та пристосування з насічкою на притискних губках.

3.12. При використанні для закріплення деталей пневматичних, гідравлічних та електромагнітних пристосувань трубки, по яких подається повітря або рідина, а також електрична проводка повинні бути захищені від механічних пошкоджень.

3.13. При заміні або вимірюванні оброблюваної деталі верстат необхідно зупинити, а різальний інструмент відвести.

3.14. Виконувати роботи на верстаті з неогороженою фрезою необхідно із застосуванням відповідних засобів індивідуального захисту.

3.15. Під час роботи на верстаті необхідно уникати накопичення стружки на фрезі та оправці. Стружку від обертової фрези необхідно періодично видаляти пензликом з ручкою завдовжки до 250 мм.

3.16. Подачу вмикати тільки після вмикання обертання фрези.

3.17. Плавню підводити фрезу до деталі, що обробляється, при працюючому верстаті без ударів, а відводити від деталі до зупинки верстату.

3.18. Деталь, що обробляється установлювати на верстат так, щоб були виключені можливості її вильоту.

3.19. При появі вібрації верстату необхідно зупинити його і усунути причину вібрації (змінити режим роботи, перевірити правильність кріплення деталі, установки інструменту).

3.20. При кожному вклученні верстату упевнитись у тому, що пуск нікому не загрожує.

3.21. Під час роботи верстата забороняється:

- вмикати верстат при виявленні будь-якої несправності;
- змащувати, чистити або прибирати стружку до повної зупинки верстата;
- спиратися на верстат, класти на нього інструмент і заготовки;
- охолоджувати фрезу або оброблювану деталь за допомогою ганчірки;
- передавати і не приймати будь-які предмети через обертові або рухомі частини верстату;
- відчиняти та знімати огорожу та запобіжні пристрої;
- зупиняти верстат шляхом гальмування фрези;
- залишати верстат, який працює без нагляду;
- при установці і зніманні заготовок.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Відвести фрезу від заготовки (деталі) до зупинки верстату і вимкнути верстат.

4.2. Після повної зупинки верстату видалити стружку з верстату за допомогою щітки, а з пазів верстатного столу металевим гачком. Не здувати стружку ротом і не знімати її рукою.

4.3. Прибрати з верстату готові деталі і заготовки, скласти їх у відведене місце.

4.4. Фрезу, вимірювальні прилади, інструмент скласти у відведене місце.

4.5. Протерти і змастити верстат, промаслене ганчір'я прибрати в металевий ящик.

4.6. Зняти спецодяг і ретельно вмити руки з милом.

4.7. Сповістити відповідальну особу (зав. лабораторією) про закінчення роботи і про всі несправності які виникли під час роботи.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. У разі виникнення аварійних чи небезпечних факторів, які можуть призвести до загрози здоров'ю чи життю робітника, необхідно:

- при загрозі ураження електричним струмом негайно вимкнути джерело електричного струму (рубильник, пакетник, вимикач, тощо). У випадку ураження робітника електричним струмом якомога швидше звільнити потерпілого від дії електричного струму. Якщо потерпілий втратив свідомість, здійснити звичайні заходи щодо повернення йому свідомості. При наявності ознак клінічної смерті у потерпілого негайно розпочати непрямий масаж серця та штучне дихання, викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103".

- при загрозі механічних травм тіла або очей негайно зупинити верстат. У разі пошкодження очей промийте їх чистою водою, якщо виявлено стороннє

тіло (ошукрок, пил тощо) по можливості видалити його, викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103". У разі поранення рук та інших частин тіла, обробити дезінфікуючими речовинами і накласти пов'язку на поранення, потім викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103".

5.2. У разі виникнення загоряння в приміщенні негайно вимкнути електрострум і почати гасіння вогню первинними засобами пожежогасіння: вогнегасником, водою, покривалом, тощо.

5.3. При виникненні пожежі необхідно:

- вимкнути діячу електромережу під електрострумом;
- евакуювати усіх людей з приміщення;
- повідомити пожежну охорону за телефоном "101";
- зачинити вікна і двері, щоб вогонь не поширювався до сусідніх приміщень;
- повідомити зав. лабораторією або зав. кафедрою;
- приступити до ліквідації осередку вогню (електропроводку слід гасити піском, вогнетривким покривалом, вуглекислотним або порошковим вогнегасником).

5.4. У разі травмування (поранення, опіки тіла, тощо) або при виникненні недомагання слід повідомити зав. лабораторією або зав. кафедрою.

Аналіз інструкції фрезерувальника відповідно до рівня ризиків.

Проаналізуємо вище наведену інструкцію за ризиками по наслідкам від невиконання або неналежного виконання її пунктів, використовуючи один із методів наведених у ДСТУ ISO 31010 [15], а саме структурований аналіз сценаріїв «Що, якщо?» (метод SWIFT). Відповідно до алгоритму було обговорено відомі небезпеки, які визначені у відповідних пунктах інструкції та заходи захисту від їх впливу:

П.п. 1.2 -1.3 інструкції - наслідки можуть бути небезпечними для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 4;

П.п. 1.4 -1.8. - наслідки можуть бути шкідливими і дуже шкідливими для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 3.1 – 3.3; п п

П.п. 2.1 - наслідки можуть бути шкідливими і дуже шкідливими для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 3.1 – 3.3;

П.п. 2.2 -2.7. - наслідки можуть бути небезпечними для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 4;

П.п. 3.1 -3.21. - наслідки можуть бути небезпечними для життя та здоров'я, відповідно до

табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 4;

П.п. 4.1. - наслідки можуть бути небезпечними для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 4;

П.п. 4.2 -4.7. - наслідки можуть бути шкідливими і дуже шкідливими для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 3.1 – 3.3;

П.п. 5.1 -5.4. - наслідки можуть бути небезпечними для життя та здоров'я, відповідно до табл.1 умови праці, згідно гігієнічній класифікації праці, – клас 4;

Сумуючи вище наведене, можна зробити висновок, що ризик роботи є небезпечним для життя та здоров'я за умов невиконання вище наведеної інструкції. За таких умов до роботи можуть бути допущені тільки навчений персонал та роботи повинні виконуватись під наглядом.

Причинно-наслідковий аналіз є структурованим методом ідентифікації можливих причин небажаної події чи проблеми. Даний метод дозволяє скомпонувати можливі причинні фактори в узагальнені категорії так, щоб можна було дослідити всі можливі гіпотези. Однак застосування цього методу дозволяє ідентифікувати тільки фактичні причини. Причини можуть бути визначені тільки на основі емпіричних даних або емпіричним шляхом.

Інформацію представляють у вигляді діаграми «риб'ячого скелета» (метод також називають діаграмою Ісікави) або іноді у вигляді древо-видної схеми. Позиції 3.1 – 4.0 на рисунку відповідають таблиці 1.

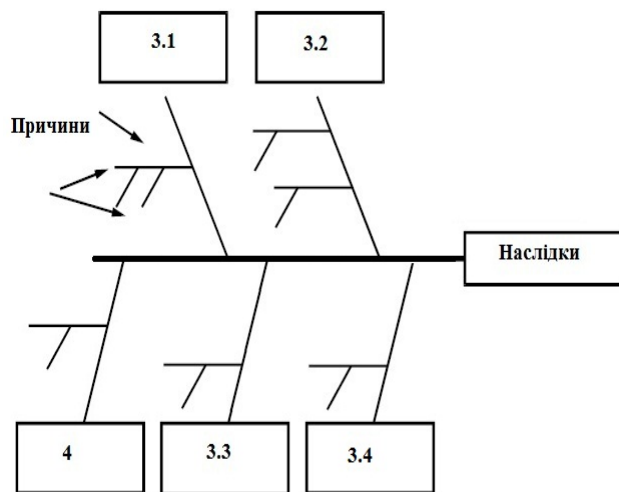


Рис. 2 – Алгоритм причинно-наслідкового аналізу інструкції за діаграмою Ісікави

Розроблений варіант новітньої інструкції з охорони праці на робочому місці фрезерувальника із урахуванням РОП, запропоновано далі.

Таблиця 3 – Нова інструкція з охорони праці на робочому місці фрезерувальника із ризиками

	Положення інструкції	Причини	Наслідки	Ризики (таблиця 1) та заходи захисту
1	2	3	4	5
Загальні положення				
1.1.	Дана інструкція розроблена у відповідності з НПАОП 0.00-1.71-13 "Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями" які затверджені Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 грудня 2013 року № 966 та "Положенням про розробку інструкцій у НТУ і діє при роботі на фрезерних верстатах у всіх підрозділах університету	Вимоги законодавства України з безпеки та гігієни праці, НПАОП 0.00-4.15-98 Положення про розробку інструкцій з охорони праці [7]	Інструкція щодо навчання та організації безпечної праці на робочому місці. Забезпечення знаннями та інформацією працівників щодо поводження із шкідливими та небезпечними чинниками на робочому місці	Максимальна величина ризику - 4 клас – небезпечні (екстремальні)
1.2.	До роботи на токарному верстаті допускаються: - особи не молодше 18 років, що пройшли спеціальне навчання;	Не має 18 років, не має спеціального навчання;	Адміністративна та кримінальна відповідальність керівництва у разі травми або загибелі працівника	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Працівник зобов'язаний дотримуватися правил носіння спецодежды, користування засобами індивідуального захисту, правил особистої гігієни
	- проінструктовані з питань охорони праці і після перевірки їхніх знань конструкції верстату, приладів, інструменту.	Інструктаж відсутній або проведений формально		
1.3.	При роботі на токарному верстаті можливий вплив на працюючих небезпечних виробничих факторів: Організаційних; Механічних; Психофізіологічних; Мікробіологічних.	Робота без захисних окулярів;	Травмування очей стружкою;	4 клас – Небезпечні (екстремальні)
		Торкання рукою обертових частин верстата, оброблюваної деталі або фрези;	Поранення рук;	працювати у спецодязі і захисних окулярах
		Невідповідний стан одягу	Намотування одягу або волосся на рухомі деталі (на обертovu оправку фрези);	
		Порушення правил електро-безпеки;	Ураження електричним струмом;	
		Необережність та неуважність.	Механічні ушкодження рухомими частинами верстатів	
		Забрудненні руки	Ураження шкіри бактеріями (дерматити)	
		Робота з недотриманням часу та норм праці	Втома	Миття рук та обличчя після завершення роботи. Використовувати ЗІЗ при роботі (рукавички).
1.4.	Робоче місце повинне бути	Стомлення	Зменшення	Клас 3.1 – 3.2

	добре освітленим, підтримуватися в чистоті, не захаращуватися сторонніми предметами і речами.	очей;	продуктивності праці, можливість ушкоджень через погане освітлення;	Малий (помірний) ризик Раціональне освітлення
		Запиленість повітря	Захворювання шкіри, органів дихання.	Робоче місце та оточуюче середовище (повітря) повинні бути чистими
2. Вимоги безпеки перед початком роботи				
2.1.	Привести до відповідного рівня діяльності одяг та зовнішній вигляд.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Одягнути та привести до ладу робочий одяг: застібнути на гудзики обшлага рукавів або стягнути їх резинкою. заправити одяг так, щоб не було вільних кінців, волосся ретельно заправити під берет (шапочку). Надіти захисні окуляри.
2.2.	Привести робоче місце до початку роботи у належний стан.	Див. п.1.4	Див. п.1.4.	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Підготувати робоче місце, виділивши все, що заважає роботі. Провести зовнішній огляд верстата і переконатися в його справності. Робота на несправному верстаті забороняється.
2.3.	Перевірити стан захисних приладів на робочому місці.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Перевірити наявність і надійність кріплення захисних огорожень і з'єднань захисного заземлення з корпусом верстата.
2.4.	Перевірити стан освітлення робочого місця.	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Відрегулювати освітлення верстату так, щоб робоча зона була достатньо освітлена і світло не засліплювало очей.
2.5.	Підготувати обладнання до роботи.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Міцно закріпити різець і оброблювану деталь, вийняти ключ з патрона і покласти його на встановлене місце.
2.6.	Перевірити можливість пуску верстату.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Перед включенням верстату впевнитися, що його пуск нікому не загрожує.
2.7.	Провести пробний пуск.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Перевірити роботу верстата на холостому ходу
3. Вимоги безпеки під час виконання роботи				
3.1.	Захист очей та дотримання безпечної робочої пози.	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Для захисту очей від уламків, котрі відлітають, користуватися захисними окулярами. Не нахилити голову близько до фрези або рухомої деталі.
3.2.	Безпека при заміні фрез. Використання спеціальних пристосувань.	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Перед установленням фрези необхідно і перевіряти цілісність та правильність заточування пластин. Пластини повинні бути без викришених місць, тріщин, припикання. Різальний інструмент не повинен мати затуплених кромки. Потрібно забезпечення робочого місця спеціальним пристосуванням, контроль обов'язковий
3.3.	Виконання операції із фрезою під час вибивання її зі шпинделя	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Для підтримування фрези під час вибивання її зі шпинделя необхідно застосовувати

				еластичні прокладки. Не дозволяється підтримувати фрезу рукою без відповідних засобів індивідуального захисту рук.
3.4.	Безпека при виконанні операції із фрезерною оправкою або фрезою, яку необхідно закріплювати в шпинделі ключем	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас - 3.2 Середній (істотний) ризик Фрезерну оправку або фрезу необхідно закріплювати в шпинделі ключем тільки після ввімкнення коробки швидкостей для запобігання повертання шпинделя. Не дозволяється затискувати та відтискувати фрезу ключем на оправці ввімкненням електродвигуна, а також залишати ключ на головці затяжного болта після установалення фрези або оправки.
3.5.	Безпека при виконанні операції установалення та закріплення фрези	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Після установалення та закріплення фрези необхідно перевіряти її радіальне та торцеве биття, яке не повинно перевищувати 0,1 мм
3.6.	Безпека при швидкісному фрезеруванні	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас - 3.2 Середній (істотний) ризик При швидкісному фрезеруванні необхідно застосовувати огороження та пристосування для уловлювання та видалення стружки (спеціальні стружко видаляючі пристрої, прозорі екрани).
3.7.	Вимоги безпеки щодо деталі, яка оброблюється	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Оброблювані деталі та пристосування, особливо базові та кріпильні поверхні, що прилягають одна до одної, і перед установаленням на верстат необхідно очищувати від стружки та мастила для забезпечення правильного установалення їх та досягнення міцності закріплення.
3.8.	Безпека при закріплюванні деталі	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Отвір шпинделя, хвостовик оправки або фрези, поверхню перехідної втулки перед установаленням у шпиндель необхідно очищувати та протирати, заборони - усувати. При встановленні хвостовика інструмент)1 в отвір шпинделя хвостовик повинен сідати щільно, без люфту. Оброблювану деталь необхідно закріплювати в місцях, що розташовані якомога ближче до оброблюваної поверхні. Для закріплювання деталей до необроблених поверхонь необхідно застосовувати лебідки та пристосування з насічкою на притисних губках. При використанні для закріплювання деталей пневматичних, гідравлічних та електромагнітних пристосувань трубки, по яких подається повітря або рідина, а також електрична проводка повинні бути захищені від механічних пошкоджень. При заміні або вимірюванні оброблюваної деталі верстат необхідно зупинити, а різальний інструмент відвести Виконувати роботи на верстаті з необгородженою фрезою необхідно із застосуванням відповідних засобів індивідуального захисту.
3.9.	Безпека при поводженні із стружкою	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Під час роботи на верстаті необхідно уникати накопичення стружки на фрези та оправці. Стружку від оберткової фрези необхідно

				періодично видаляти пензликом з ручкою завдовжки до 250 мм.
3.10	Безпека при роботі із фрезою	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) При заміні або вимірюванні оброблюваної деталі верстат необхідно зупинити, а різальний інструмент відвести. Виконувати роботи на верстаті з необгородженою фрезою необхідно із застосуванням відповідних засобів індивідуального захисту. Подачу вмикати тільки після вмикання обертання фрези. Плавню підводити фрезу до деталі, що обробляється, при працюючому верстаті без ударів, а відводити від деталі до зупинки верстату. Деталь, що обробляється установлювати на верстат так, щоб були виключені можливості її вильоту. При появі вібрації верстату необхідно зупинити його і усунути причину вібрації (змінити режим роботи, перевірити правильність кріплення деталі, установки інструменту). При кожному включенні верстату упевнитись у тому, що пуск нікому не загрожує.
3.11.	Категорично забороняється під час роботи верстату	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Заходи безпеки: Забороняється - вмикати верстат при виявленні будь-якої несправності; - змащувати, чистити або прибирати стружку до повної зупинки верстата; - спиратися на верстат, класти на нього інструмент і заготовки; - охолоджувати фрезу або оброблювану деталь за допомогою ганчірки - передавати і не приймати будь-які предмети через обертові або рухомі частини верстату: - відчиняти та знімати огорожу та запобіжні пристрої: - зупиняти верстат шляхом гальмування фрези: - залишати працюючий верстат без нагляду: - при установці і зніманні заготовок.
4. Вимоги безпеки після закінчення роботи				
4.1.	Безпека при зупинки верстату	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) Відвести фрезу від заготовки (деталі) до зупинки верстату і вимкнути верстат.
4.2	Безпека при прибиранні верстату	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Після повної зупинки верстату видалити стружку з верстату за допомогою щітки, а з пазів верстатного столу металевим гачком. Не здувати стружку ротом і не змітати її рукою. Прибрати з верстату готові деталі і заготовки, скласти їх у відведене місце. Фрезу, вимірювальні прилади, інструмент скласти у відведене місце. Протерти і змастити верстат, промаслене ганчір'я прибрати в металевий ящик.
4.3.	Санітарно-гігієнічні вимоги після закінчення роботи	Див. п.1.4	Див. п.1.4	Клас 3.1 – 3.2 Малий (помірний) ризик Зняти спецодяг і ретельно вимити руки з

				милом. Сповістити відповідальну особу (зав. лабораторією) про закінчення роботи і про всі несправності які виникли під час роботи.
5. Вимоги безпеки в аварійних, ситуаціях				
5.1.	Травмування працівника	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) У разі травмування (поранення, опіки тіла, тощо) або при виникненні недомагання слід повідомити зав. лабораторією або зав. кафедрою
5.2.	Ураження електричним струмом	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) При загрозі ураження електричним струмом негайно вимкнути джерело електричного струму (рубильник, пакетник, вимикач, тощо). У випадку враження робітника електричним струмом якомога швидше звільнити потерпілого від дії електричного струму. Якщо потерпілий втратив свідомість, здійснити звичайні заходи щодо повернення йому свідомості. При наявності ознак клінічної смерті у потерпілого негайно розпочати непрямий масаж серця та штучне дихання, викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103".
5.3.	Механічна травма тіла або очей	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) При механічних травмах тіла або очей негайно зупинити верстат. У разі пошкодження очей промити їх чистою водою, якщо виявлено стороннє тіло (ошурок, пил тощо) по можливості видалити його, викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103". У разі поранення рук та інших частин тіла, обробити дезінфікуючими речовинами і накласти пов'язку на поранення, потім викликати швидку медичну допомогу за телефоном "103".
5.4.	Виникнення пожежі	Див. п.1.3	Див. п.1.3	4 клас – Небезпечні (екстремальні) При виникненні пожежі необхідно: - вимкнути діючу електромережу під електрострумом; - евакуувати усіх людей з приміщення; - повідомити пожежну охорону за телефоном "101"; - зачинити вікна і двері, щоб вогонь не поширювався до сусідніх приміщень; - повідомити зав. лабораторією або зав. кафедрою; - приступити до ліквідації осередку вогню (електропроводку слід гасити піском, вогнетривким покривалом, вуглекислотним або порошковим вогнегасником.

Деякі з пунктів попередньої інструкції, не відносяться до питань охорони праці, а є суто технологічними і це відразу видно після заповнення інструкції за наведеною вище формою. Окрім цього, у новітньої формі, виконується конкретизація питань щодо заходів безпеки. У попередньому варіанті інструкції, заходи безпеки було перемішано із конкретними етапами виконання завдань на робочому місці.

Розроблену нову карту ризику, для робочого місця фрезерувальника, наведено у додатку 1.

Висновки. Виконано аналіз методики складання інструкцій з охорони праці на прикладі інструкції з охорони праці на робочому місці фрезерувальника. Визначено основні показники небезпеки та гігієни праці, які необхідно зберегти при розробці та складанні нової інструкції.

1. Виконано аналіз інструкції фрезерувальника відповідно до рівнів ризиків.

2. Встановлено, що необхідно доопрацювання та визначення узагальнювального ризику із урахуванням гігієнічних показників. Розроблено методику розрахунку узагальнювального ризику;

3. Розроблено нову форму та зміст інструкції, з інтеграцією показників, які застосовувались раніш та новітніх показників ризиків. Форма є шаблоном для складання інструкцій у вигляді відповідному до утворення інформаційної бази.

4. Виконано аналіз карт ризиків, які використовуються та запропоновано нову, як додаток до інструкції з охорони праці

Додаток 1

Фрагмент Карти ризиків для виконання робіт на фрезерних верстатах
Місце роботи – лабораторія університету

Вид ризику, шкідливий фактор або небезпечна ситуація	Джерело небезпеки	Небезпечна ситуація	Величина ризику G 1-7	Заходи по зниженню ризику
1	2	3	4	5
Ризик некваліфікованості	Людський фактор	Травмування від незнання особливостей трудового процесу, від недостатньої відповідальності	G6. Ризик вкрай високий	Професійний відбір Професійне навчання. Інструктаж з ОП, перевірка знань.

Список літератури

- Rothstein H. et al. Varieties of risk regulation in Europe: coordination, complementarity and occupational safety in capitalist welfare states. *Socio-Economic Review*. 2019. Vol. 17, №. 4. P. 993-1020.
- Jilcha K., Kitaw D. Industrial occupational safety and health innovation for sustainable development. *Engineering science and technology, an international journal*. 2017. Vol. 20. №. 1. P. 372-380.
- Atkinson W. Enterprise risk management at Wal-Mart. *Risk Management*. 2003. Vol. 50. №. 12. P. 36-40.
- Березуцький В. В., Ільїнська О. І. Досвід впровадження ризик-орієнтованого підходу в систему управління охороною праці на підприємстві. *Збірник тез доповідей XI-ї міжнародної науково-методичної конференції та 138 Міжнародної конференції (EAS) «Безпека людини у сучасних умовах» (5-6 грудня 2019 р.)* Харків: ФОП Панов А.М., 2019. С.26-27
- Березуцький В. В. *Ризик орієнтований підхід в охороні праці*. LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 108 с.
- Березуцький В. В., Горбенко В. В. Оцінка ризиків від ХПІ. *Охорона праці*. 2017. № 11. С. 22-24.
- НПАОП 0.00-4.15-98 *Положення про розробку інструкцій з охорони праці*. Офіційний вісник України від 23.04.1998, 1998 р., № 14, с. 258, стаття 557, код акта 5150/1998.
- ДСаНПіН *Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу /* Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14> (дата звернення: 20.04.2020).
- Кундієв Ю.І., Яворовський О. П., Шевченко А. М. та ін. *Гігієна праці: підручник* / ред. Кундієва Ю.І., Яворовського О.П. Київ: ВСВ «Медицина», 2011. 904 с.
- ДСТУ EN ISO 12100:2016 Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) / Нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
- ДСТУ ISO 31000 :2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT) URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 (дата звернення: 20.05.2020).
- Наказ від 30.03.2017 N 526 «Про внесення змін до Положення про розробку інструкцій з охорони праці» / Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0779-17> (дата звернення: 1.06.2020).
- НПАОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» / Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14> (дата звернення: 20.0.2020).

15. Інструкції з ОП та ПБ / Херсонський національний технічний університет. URL: <http://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/11474> (дата звернення: 20.04.2020).
16. ДСТУ ISO 31010 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT) / Нац. стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 74 с.

References (transliterated)

1. Rothstein H. et al. Varieties of risk regulation in Europe: coordination, complementarity and occupational safety in capitalist welfare states. *Socio-Economic Review*. 2019, Vol. 17, №. 4. pp. 993-1020.
2. Jilcha K., Kitaw D. Industrial occupational safety and health innovation for sustainable development. *Engineering science and technology, an international journal*. 2017, Vol. 20. no. 1. pp. 372-380.
3. Atkinson W. Enterprise risk management at Wal-Mart. *Risk Management*. 2003, Vol. 50. no. 12. pp. 36-40.
4. Berezuts'kyi V. V., Il'yins'ka O. I. Dosvid vprovadzhennya ryzyk-oriyentovanoho pidkhodu v systemu upravlinnya okhoronoyu pratsi na pidpryyemstvi. [Experience in implementing a risk-oriented approach to occupational safety management at the enterprise]. *Zbirnyk tez dopovidey XI -yi mizhnarodnoyi naukovo-metodychnoyi konferentsiyi ta 138 Mizhnarodnoyi konferentsiyi (EAS) «Bezpeka lyudyny u suchasnykh umovakh» (5-6 hrudnya 2019 r.)* [Proceedings of the XI International Scientific and Methodological Conference and 138 International Conference (EAS) "Human Security in Modern Conditions" (December 5-6, 2019)] Kharkov.; FOP Panov A.M. Publ., 2019. pp. 26-27.
5. Berezuts'kyi V. V. Ryzyk oriyentovany pidkhid v okhoroni pratsi. [Risk-oriented approach in labor protection.] LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 108 p.
6. Berezuts'kyi V. V., Horbenko V. V. Otsinka ryzykiv vid KhPI. [Risk assessment of HPI]. *Okhorona pratsi*. [Occupational safety]. 2017. no. 11. pp. 22-24.
7. NPAOP 0.00-4.15-98 Polozhennya pro rozrobku instruksiy z okhorony pratsi. [Legal act 0.00-4.15-98 Regulations on the development of instructions on labor protection.] Official Gazette of Ukraine from 23.04.1998, 1998, № 14, p. 258.
8. DSaNPiN Hihiyenichna klasyfikatsiya pratsi za pokaznykamy shkidlyvosti ta nebezpechnosti faktoriv vyrobnychoho seredovyshcha, vazhkosti ta napruzhenosti trudovoho protsesu [State Standard Hygienic classification of labor on the indicators of harmfulness and danger of factors of the production environment, the severity and intensity of the labor process]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14> (accessed 20.04.2020).
9. Kundiyev Yu.I., Yavorovs'kyi O. P., Shevchenko A. M. ta in. *Hihiyena pratsi: pidruchnyk* [Occupational hygiene: a textbook]. Kiev, VSV "Medytsyna" Publ., 2011. 904 p.
10. DSTU EN ISO 12100:2016 Bezpechnist' mashyn. Zahal'ni pryntsypy proektuvannya. Otsynuyannya ryzykiv ta zmeshennya ryzykiv (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) [State Standard EN ISO 12100: 2016 Safety of machines. General principles of design. Risk assessment and risk reduction (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT)]. Kyiv: DP "UkrNDNTs" Publ., 2018.
11. DSTU ISO 31000 :2018 Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT) [State Standard ISO 31000: 2018 Risk management. Principles and guidelines (ISO 31000: 2018, IDT)]. Available at: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 (accessed 20.05.2020).
12. Nakaz vid 30.03.2017 N 526 "Pro vnesennya zmin do Polozhennya pro rozrobku instruksiy z okhorony pratsi" [Order of 30.03.2017 N 526 "About modification of the Situation on development of instructions on labor protection"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0779-17> (accessed 1.06.2020).
13. NPAOP 0.00-1.71-13 "Pravyla okhorony pratsi pid chas roboty z instrumentom ta prystroyamy" [Legal act 0.00-1.71-13 "Rules of labor protection when working with tools and devices"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14> (accessed 20.0.2020).
14. Instruksiyi z OP ta PB [Instructions on OS]. Available at: <http://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/11474> (accessed 20.04.2020).
15. DSTU ISO 31010 Keruvannya ryzykom. Metody zahal'noho otsynuyannya ryzyku (IEC/ISO 31010:2009, IDT) [State Standard ISO 31010 Risk management. General risk assessment methods (IEC / ISO 31010: 2009, IDT)] Kyiv: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2015. 74 p.

Надійшла (received) 02.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Береzuцький Вячеслав Володимирович (Береzuцький Вячеслав Владимирович, Berezutskyi Viacheslav Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7318-1039>; e-mail: viaberezuc@gmail.com

Ільїнська Ольга Ігорівна (Ильинская Ольга Игоревна, Ilynska Olha Igoryvna) – старший викладач кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6617-5354>; e-mail: souzbgd@gmail.com

BILOVOL H., KOMAR S., VASILENKO O., PANCHUK O., RUKAVISHNIKOV P.

ENSURING MAXIMUM ENERGY EFFICIENCY OF WORKING PLACES ON THE BASIS OF SYSTEM ENERGY AUDIT

A method for ensuring the maximum energy efficiency of working places on the basis of system energy audit is proposed. The method is based on the use of certain complete sets of ways to obtain the necessary functional properties of working places and structures of ways to ensure energy efficiency of processes. The expediency of the use of general models for integrated structural-parametric optimization of systems and linearized models of energy supply and consumption processes is shown. A complete set of structures of possible solutions has been developed for every path on ensuring the necessary functions of the working place. It is shown that the formation of a complete set (within the accepted classification) of possible structural solutions can be achieved by topological product of complete sets of ways to obtain the desired functional properties of jobs and structures of ways to ensure energy efficiency processes. For each structurally excellent path, a relationship system is proposed according to which the search for reserves of energy saving and energy efficiency can be carried out within the limits of blocking circuits.

Keywords: Limiting energy efficiency working places, full set, functional properties, structures of methods, integrated optimization, linearized models.

**БІЛОВОЛ Г.В., КОМАР С.В., ВАСИЛЕНКО О.В., ПАНЧУК О.В., РУКАВИШНИКОВ П.В.
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОЧИХ МІСЦЬ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО
ЕНЕРГОАУДИТУ**

Запропоновано метод забезпечення граничної енергоефективності робочих місць на основі системного енергоаудиту. Метод базується на використанні визначених повних множин шляхів отримання потрібних функціональних властивостей робочих місць і структур способів забезпечення енергоефективності процесів. Показана доцільність застосування при цьому загальних моделей комплексної структурно-параметричної оптимізації систем та лінеаризованих моделей процесів подачі та споживання енергії. Розроблена повна множина структур можливих рішень на кожному шляху забезпечення необхідних функцій робочого місця. Показано, що формування повної множини (у межах прийнятої класифікації) можливих структурних рішень може бути забезпечене шляхом топологічного добутку повних множин шляхів отримання потрібних функціональних властивостей робочих місць і структур способів забезпечення енергоефективності процесів. Для кожного структурно відмінного шляху запропонована система залежностей, по якій у межах блокуючих контурів може здійснюватись пошук резервів енергозбереження та підвищення енергоефективності.

Ключові слова: гранична енергоефективність, робочі місця, повна множина, функціональні властивості, структури способів, комплексна оптимізація, лінеаризовані моделі.

**БЕЛОВОЛ А.В., КОМАР С.В., ВАСИЛЕНКО О.В., ПАНЧУК А.В., РУКАВИШНИКОВ П.В.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО
ЭНЕРГОАУДИТА**

Предложен метод обеспечения предельной энергоэффективности рабочих мест на основе системного энергоаудита. Метод основан на использовании определенных полных множеств путей получения нужных функциональных свойств рабочих мест и структур способов обеспечения энергоэффективности процессов. Показана целесообразность применения при этом общих моделей комплексной структурно-параметрической оптимизации систем и линеаризованных моделей процессов подачи и потребления энергии. Разработана полная множество структур возможных решений на каждом пути обеспечения необходимых функций рабочего места. Показано, что формирование полного множества (в рамках принятой классификации) возможных структурных решений может быть обеспечено путем топологического произведения полных множеств путей получения нужных функциональных свойств рабочих мест и структур способов обеспечения энергоэффективности процессов. Для каждого структурно отличного пути предложена система зависимостей, по которой в пределах блокирующих контуров может осуществляться поиск резервов энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Ключевые слова: предельная энергоэффективность, рабочие места, полная множество, функциональные свойства, структуры способов, комплексная оптимизация, линеаризованные модели.

1 Introduction. Energy efficiency of products is an important factor of their competitiveness. It is provided at every working place. Obviously, the overall energy efficiency for each process variant will be the higher, the higher the energy efficiency in all actions.

Because of this, great attention is paid to energy efficiency of serial production which types include the production of vehicles, agricultural machinery, etc. The goal is to ensure the highest possible energy efficiency in every working place. One way to achieve this is system auditing. It requires a certain technique, which should provide theoretically and practically acceptable results. But up to this day, there are no approaches to the development of a general energy audit method, which would allow us to obtain extremely high energy efficiency of the process at each working place.

2 Literature review. The issues of ensuring high energy efficiency of processes and energy saving are dealt with in many publications concerning both

industrial policy in general [1] and certain aspects [2-12]. In particular, the work [2] addressed the issues of formation and selection activities in regional energy saving programs in engineering and construction. The paper [3] outlines the application of project management methodology to improve the energy efficiency of innovative technical systems of the new type. The work [4] is devoted to the system classification of construction and machine-building innovations intended for use in calculating energy efficiency indicators. Methods of applying the principles of variability, transformability, redundancy, and integrated optimization in solving energy saving and energy efficiency problems are described in [5].

A significant contribution to the development of the energy saving and energy efficiency theory was the paper [6] where the synthesis of the full set of general structures for ways to improve energy efficiency of production has been performed, and the paper [7] where general models

for the energy use and conservation in industrial enterprises have been proposed. Some energy saving issues with the use of artificial intelligence and variative systems are considered in [8, 9]. System solution of energy saving tasks at industrial enterprises is proposed in the paper [10].

The work [11] is devoted to ensuring the highest possible economic effectiveness of regional energy saving programs at the stage of making project decision. Adaptive approach to regulation of the "effect / cost" ratio in consumers and enterprises producing energy-saving equipment for railways was described in the paper [12].

3. The aim and objectives of research. The purpose of this study is the theoretical justification and development of a method for ensuring the ultimate energy efficiency of jobs in production systems based on system energy audit. To achieve this goal it is necessary to perform the following tasks:

1. Identifying many ways to obtain the desired functional properties of jobs.

2. Synthesis of structures of ways to ensure high energy efficiency of workplaces.

3. Development of a system energy audit algorithm based on the use of a general model of target transformations that occur during the interaction of the transforming system and the transformed one.

4. Presentation of the main material.

Despite a significant number of publications devoted to solving the energy efficiency and energy saving issues, the problem of ensuring the maximum energy efficiency of working places on the basis of system energy audit has not yet been set, and a general algorithm for its solution has not been proposed. The main reason for this situation is that the published works did not form a common set of possible structural solutions, without which it is not possible to formulate and to propose the specified algorithm.

The purpose of this study: development of a method for ensuring the maximum energy efficiency of working places based on energy audit system using full sets of ways to obtain the desired functional properties of working places and structures of ways to ensure energy efficiency of processes.

Ensuring limiting efficiency of any process as a system can be achieved in solving the problem of integrated structural and parametric optimization [13]. A peculiarity of such a formulation of the problem is the need to search for complete sets of possible structural solutions, among which one or several optimal solutions are determined by the optimality criterion, what corresponds for each case to the parametric optimization of the system. Upon that, the search for this solution is carried out using discrete-continuous 3D-models of clusters of blocking circuits that form the areas of permissible parametric solutions within each path to ensure the required properties of working places.

The paths for ensuring the required properties of the systems are defined in [14]. Proceeding from them, it is possible to form a matrix of possible structural solutions for ways of ensuring the required properties of working

places, which should be considered during a system energy audit. It may have the following form:

$$M_{sh} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T & F \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N & T & F \\ 0 & 0 & 0 & M & N & T & F \\ D & P & I & S & N & T & F \\ D & P & I & S & N & T & F \\ D & P & I & S & T & N & F \end{pmatrix},$$

where the following designation of the phase cycles of a life cycle for working place technical means are taken: F - functioning; T - retraining; N - changeover; M - modernization; P - designing; I - manufacturing; C - testing and certification; D - research within the framework of a type of technical means; D^* - research on the creation of new types of technical means for a working place.

Using the data given in [6], it is possible to form a vertical vector of possible ways for energy efficiency improvements. Within the framework of the notations approved in the specified work, this vector can be written as follows:

$$\mathbf{r} = \{I_s \times N, U_m \times N, S_m \times N, I_s \times h, U_m \times h, S_m \times h, I_s \times O_d, U_m \times O_d, S_m \times O_d, I_s \times V_d, U_m \times V_d, C_m \times B_d, I_s \times P_r, U_m \times P_r, S_m \times P_r, D_o \times N^*, U_v \times N^*, R_d \times N^*, P_r \times h^*, U_v \times h^*, R_d \times h^*, D_s \times O_d^*, U_v \times O_d^*, R_d \times O_d^*, D_s \times V_d^*, U_v \times V_d^*, R_d \times V_d^*, D_s \times P_r^*, U_v \times P_r^*, R_d \times P_r^*\}, \quad (1)$$

where the set of functions, the duration of which affects the energy consumption, are as follows: O_d - main actions, V_d - auxiliary actions, P_r - downtimes; the set of techniques that can reduce power consumption, reducing the cycle length: I_s - exception, U_m - decrease; S_m - combination; index * means a symmetric set of techniques aimed at energy self-sufficiency of the system, for the energy-conversion efficiency: D_o - addition, U_v - increase, R_d - separation.

Having formed the specified components of the set by their topological multiplication, we can obtain a complete (within the accepted classification) set (matrix) M_r of possible solutions:

$$M_r = M_{sh} \times \mathbf{r}^t, \quad (2)$$

where superscript t indicates transposition.

It is necessary to carry out parametric optimization for each element of the set M_r as for one of the possible structural solutions.

The problem of integrated parametric optimization of a working place as a system can be formalized on the basis of a universal relationship system [14]:

$$W1(Z), W2(Z), \dots, Wn(Z), \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{w}(t, \vec{z}_k, \vec{u}_k) \Rightarrow \vec{w}(t)_{opt}, \\ u_k = \sum_{\xi}^l f_k(\delta_{\xi} u_{o\xi}^*), \\ \vec{z} = \Phi_c(t, \vec{y}, \vec{u}), \\ u_o = \sum_{\eta}^m f_o(\delta_{\eta} u_{n\eta}^*), \\ u_n = \sum_{\tau}^n f_n(\delta_{\tau} u_{\tau}^*), \\ \delta_g(t) \in \{0, 1\}, \\ g \in \{\xi, \eta, \tau\}, \\ Al_i^-(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t) \leq Al_i(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t) \leq Al_i^+(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t), \\ i \in \{1, l\}; \\ F_j^-(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t) \leq \Phi_j(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t) \leq F_j^+(|S_{\Sigma}|, \vec{P}, t), \\ j \in \{1, m\}; \\ \vec{P}_{ijk}^- \leq \vec{P}_{ijk} \leq \vec{P}_{ijk}^+, \\ k \in \{1, n\}, \\ \vec{P} \in \{\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\}, \end{array} \right. \quad (4)$$

where W – the optimality criterion vector; t – time; x_1, x_2, x_n ; y_1, y_2, y_m ; z_1, z_2, z_k ; $u_N, N \in \{k, o, n\}$ – parameters and actions which perform control at the super-system, system and subsystem levels, respectively; δ_g – the sequence of introduction of control actions; Al sign means the algorithm of the procedure provided by the theory of deductive systems for determining the values of algorithmic constraints and tolerances on them; $F, \int_n$ – functional relationships; $|S_{\Sigma}|$ – structure; $\vec{P}$ – vector of parameters; subscripts mean the following: k – supersystem; o – system; n – subsystem; i – hierarchy level; j – number of functional constraints; p – relation to the parameter; opt – optimal value; superscripts “-” and “+” mean, respectively, the lower and upper tolerances.

The vector $W1(Z), W2(Z) \dots Wn(Z)$ is used as an optimality criterion which in this case should reflect the value of the energy efficiency indicator.

Energy efficiency (E_f) of the production is estimated by the amount of energy (Q_e) spent on the achievement of the target on the planned volume of transformation (A_f) compared to the ideal value of this indicator.

$$E_f = \frac{Q_e}{A_f}. \quad (5)$$

Based on (4), the concretized relationship for the calculation of specific energy consumption characterizing the energy efficiency of the system can be represented in the form:

$$E_f = \int_0^{T_u} N^* dt / A_f = \sum_{i=1}^n (Ni^* Ti^* hi) / \sum_{i=1}^m A_i, \quad (6)$$

where: N, Ni, Ti, hi, Ai – design and real power input averaged within the phase cycle, power usage time (phase cycle duration), total energy loss ratio (the value inverse

to efficiency coefficient h^* of the energy-consuming element of the system) at the i -th transformation, and the volume of the executed i -th transformations, respectively; n, m – the number of the energy-consuming (supplying) elements of the system and transformations.

The dependence for calculating the growth (increase) in energy efficiency can be found by calculating the differential of the variable components from formula (5), taking into account that the integral energy saving model (reduction of energy consumption) has the form:

$$\begin{aligned} -\Delta E &= \int_0^{T_u} \frac{dE_3}{dt}(t) dt; \\ dE_f &= 2 \sum_{i=1}^n (Ni^* Ti^* hj) dA_{\phi} / [\sum_{i=1}^m (Ai)]^2 + \\ &\sum_{i=1}^n (dNi^* Ti^* hi + dTi^* Ni^* hi + \dots \\ &\dots + dhi^* Ni^* Ti) / \sum_{i=1}^m Ai. \end{aligned} \quad (7)$$

For a systematic search for energy saving and energy efficiency reserves, we can get a non-concretized model of total energy consumption by assigning its energy consumption values to each type of function, in the form:

$$E_i = \sum_{j=1}^k E_{jo}(t) + \sum_{j=1}^k E_{ju}(t) + \sum_{j=1}^k E_{jd}(t), \quad (9)$$

where $E_i, i \in \{o, u, d\}$ – energy costs for implementation of core (o), management (u) and support (d) functions (including preparatory), respectively; n, m, k is the number of subsystems that implement these functions;

Relationships (3) are constructed by parameterizing the elements and relationships of the structural model, including limiting ones, and the subsequent step-by-step concretization.

Models of the first level of concretization unfolded along the time coordinate in accordance with the typical linearized energy consumption schedules are shown in Figures 1 and 2 for an enterprise as a whole and for its management and control subsystem [7].

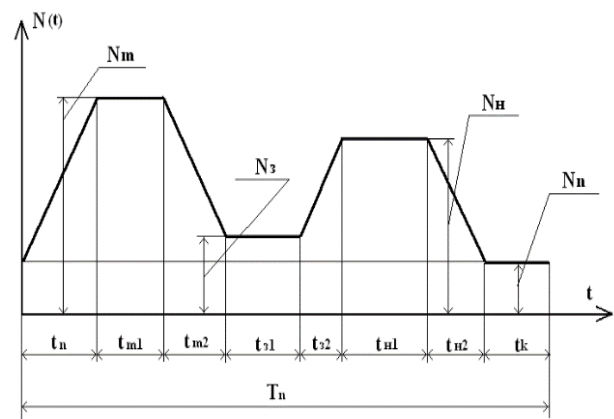


Fig. 1 – Typical Power Supply Schedule

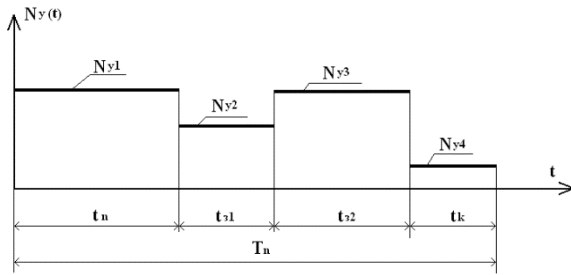


Fig. 2 – Typical Power Consumption Schedule for management and control needs

As a first approximation, the models can be represented by the following relationships at the time point: $t = T_p$:

$$\sum_{j=1}^k E_k(T_n) = N_{y1} \cdot (t_{31} - t_n) + N_{y2} \cdot (t_{32} - t_{31}) + N_{y3} \cdot (t_{33} - t_{32}) + N_{ym} \cdot (T_n - t_k). \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^k E_i(T_n) = \sum_{j=1}^k E_k(T_n) - \sum_{j=1}^k E_y(T_n), \quad (11)$$

where N_j , t_j , $j \in \{n, m_1, m_2, s_1, s_2, n_1, n_2, k\}$ - power consumption and time points corresponding to the beginning of work, the end of reaching the maximum production capacity period, the power consumption by the end of the first production capacity decline, the beginning of the second rise, the power consumption by the end of the second rise, the beginning of the second production capacity decline, and by the end of the second production capacity decline, respectively; T_p - the planned period of time.

When developing the relationships (9) we used the averaged specific utility (non-production) costs $N_k(T_p)$, i.e. we accepted that $N_k(T_n) = \text{const}$. We could enter the following relative indicators to further specify these relationships:

- energy:

$$\eta_{nm} = \frac{N_n}{N_m}; \eta_{3m} = \frac{N_3}{N_m}; \eta_{hm} = \frac{N_h}{N_m}; \eta_{n3} = \frac{N_n}{N_3};$$

$$\eta_{yx} = \frac{N_{y1}}{N_k(T_n)}; \eta_{y21} = \frac{N_{y2}}{N_{y1}}; \eta_{y31} = \frac{N_{y3}}{N_{y1}};$$

- time:

$$\xi_{nm} = \frac{t_{m1} - t_n}{T_n}; \xi_{mm} = \frac{t_{m2} - t_{m1}}{T_n}; \xi_{3m} = \frac{t_{31} - t_{m2}}{T_n};$$

$$\xi_{mn} = \frac{t_{n1} - t_{m2}}{T_n}; \xi_{n3} = \frac{t_{n1} - t_{32}}{T_n}; \xi_{nn} = \frac{t_{n2} - t_{n1}}{T_n};$$

$$\xi_{kn} = \frac{t_k - t_{n2}}{T_n};$$

$$\xi_{3n} = \frac{t_{31} - t_n}{T_n}; \xi_{33} = \frac{t_{32} - t_{31}}{T_n}; \xi_{T3} = \frac{T_n - t_{32}}{T_n};$$

$$\xi_{y1} = \frac{t_{31} - t_n}{T_n};$$

$$\xi_{y2} = \frac{t_{32} - t_{31}}{T_n}; \xi_{y3} = \frac{t_k - t_{32}}{T_n}; \xi_{ym} = \frac{T_n - t_k}{T_n}.$$

Taking into account the presence of additive structures, the optimization procedure should be reasonably performed using discrete-continuous 3D models of clusters with blocking circuits that form the areas of permissible parametric solutions within each path to ensure the required properties of working places. This takes into account physical, technical, economic, organizational and time constraints, the totality of which provides data for the formation of blocking circuits. The scheme of the method for a multioperational process is illustrated in Figure 3 [14], where a cluster of blocking circuits in the coordinates of the processing modes (with speed n and feed s) is formed.

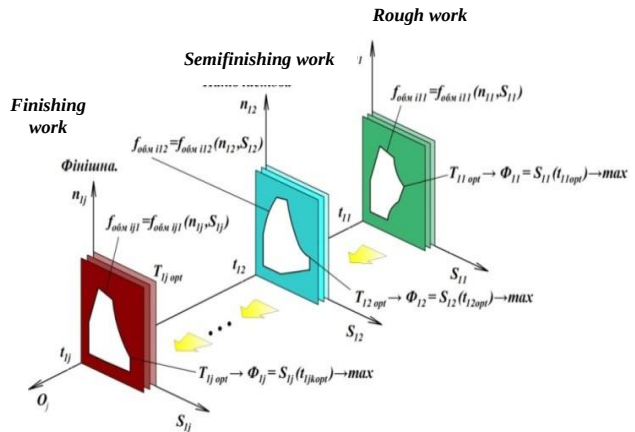


Fig. 3 – Discrete-continuous model of blocking circuit clusters

From the figure shown it follows the possibility to choose the most effective solution for the presented cluster. Within the full set of clusters corresponding to the full set M_r of the structural solutions that should be considered in a systemic energy audit, there is the ability to determine a globally effective solution by performing a comparative procedure.

Conclusions. The full set $M_R = M_{sh} \times r^f$ was received for the structures of possible decisions on each way of ensuring the necessary functions of a working place.

For each structurally different path a relationship system is proposed, which can be used to find reserves of energy saving and energy efficiency within the limits of blocking circuits. The resulting linearized relationships for calculating the energy efficiency criterion have been obtained. These relationships can be simplified by taking into account the specifics and types of working places.

Ensuring maximum energy efficiency of working places based on system energy audit can be achieved by formalized setting up and solution of the problem of integrated structural-parametric optimization of processes

and technical means using complex optimality criteria and taking into account existing constraints. The formation of complete (within the accepted classification) possible structural decisions can be achieved by the use of topological product of complete sets of ways to obtain the desired functional properties of working places and structures of ways to ensure energy efficiency of processes. Linearized models of energy supply and consumption processes can be used for parametric optimization. It is advisable to search for the optimal solution by using discrete-continuous 3D-models of clusters with blocking circuits which form the field of permissible parametric solutions within each path to ensure the required properties of working places. To perform energy audit of a system, it is advisable to create databases specialized for various kinds and types of working places.

References:

1. Amosha O.I. *Industrial policy of Ukraine: conceptual guidelines for the midterm* / Amosha A.I., Vishnevsky V.P., Zbarazhskaya L.A. // *Economy of Ukraine*. - 2009. - № 12. - p. 4-13.
2. Dmitruk I.A. Formation and selection of measures for regional energy saving programs in engineering and construction / I.A. Dmitruk, R.Y. Kogut, A.N. Pechenik et. al // *Bulletin of the National Technical University "KPI": collection of scientific papers*. - 2012. - Issue 53 (959). - p. 136-139.
3. Dmitruk I.A. *Application of project management methodology to improve the energy efficiency of innovative variable systems* / I.A. Dmitruk, O.M. Krasnoshtan, R.Y. Kogut, A.N. Pechenik // *Economic Bulletin of the National Mining University: scientific-theoretical and informational and practical journal*. - 2012. - Issue 2. - p. 97-101.
4. Dmitruk I.A. *Systemic classification of construction and engineering innovations for use in the calculation of economic, energy and environmental performance* // I.A. Dmitruk, R.Y. Kogut, A.N. Pechenik et al. // *Utilities of cities: scientific and technical collection*. - 2011. - Issue 106. - p. 133-139.
5. Dmitruk I.A. *Application of the principles of variability, transformation, redundancy and integrated optimization in solving problems of energy saving and energy efficiency* / I.A. Dmitruk, R.Y. Kogut, A.N. Pechenik and others // *Utilities of cities: scientific and technical compilation*. - 2012. - Issue 107. - p. 484-490.
6. Dmitruk I.A. *Synthesis a complete set of common structures for ways to increase energy efficiency of production* / Dmitruk I.A., Kogut R.Y., Pechenik A.N. other // *Municipal community facilities: collection of scientific and technical papers*. - 2012. - Issue 109 - p. 96-106.
7. Pechenik A.N. *Patterns of use and conservation energy in industrial enterprises* / *Modern problems of science and education: materials of the 12th International Interdisciplinary Scientific-Practical Conference dated April 30 - May 9, 2011, Alushta - Kharkiv, "Ukrainian Association "Women in Science and Education".* Kharkiv National University named after V.N. Karazin. 2011, pp. 71-72.
8. Dmitruk I.A. *The use of technologies of energy saving, variability and artificial intelligence in the automobile industry and vehicle fleet of Ukraine* / I.A. Dmitruk, R.J. Kogut, A.N. Pechenik and etc. // *Materials of the First International Scientific and Practical Conference "Improving the performance properties of transport vehicles"*. - Surgut, 2012. - p. 44-47.
9. Zemlyachenko A.I. *Using alternative systems as energy-saving means* / O.I. Zemlyachenko, R.J. Kogut, O.M. Pechenik and others // *Modern problems of humanization and harmonization of management. Materials of 10th International Interdisciplinary Scientific Practical Conference / X-th Conference of "Ukrainian Association "Women in Science and Education. "Kharkiv National University named after V.N. Karazin. 2012. - pp. 147-148.*
10. Pechenik A.N. *System solution of energy saving tasks at the enterprises of the industry* / A.N. Pechenik, R.Y. Kogut,

M.E.Ternyuk // *Modern problems of science and education: Materials of the International Interdisciplinary Scientific and Practical Conference dated April 27 - May 9, 2010. Alushta. "Ukrainian Association "Women in Science and Education".* Kharkiv National University named of V.N. Karazin. p.

11. Ternyuk M.E. *Ensuring the highest possible economic efficiency of regional energy saving programs at the stage of making design decisions* / M.E.Ternyuk, R.Y.Kogut, O.M. Pechenik, V.G.Salnikov // *New topic.№2 (31). 2012 Pp. 48-50.*
12. Pechenik A.N. *Adaptive approach to the regulation of the "effect / cost" ratio among consumers and enterprises that produce energy-saving equipment for railways* / A.N. Pechenik, A.S. Bukreeva, A.V. Belovol and etc. // *Bulletin of the economy of transport and industry (collection of scientific papers). Issue 50 - 2015 - P.259-266.*
13. Ternyuk N.E. *Bases of complex automation of technological systems for production of cogwheels: the thesis for a Doctor's of Engineering Sciences: 05.02.08* / Nikolay Emmanuilovich Ternyuk. - H., 1983. - 433 p.
14. Gladkaya N.M. *A synthesis of innovative vehicles optimized as a single package taking into account the laws of their development: the thesis for a Candidate of Engineering Sciences: 05.22.01* / Nadezhda M. Gladka. - Kharkov, 2015. 184 p.

References (transliterated)

1. Amosha O.I. *Promy'shlennaya politika Ukrainy: konceptual'ny'e orientiry na srednesrochnuyu perspektivu* / Amosha O.I., Vishnevskij V.P., Zbaraz'ka L.O. // *E'konomika Ukrainy*. - 2009. - # 12. - S. 4 -13.
2. Dmitruk I.A. *Formuvannya ta vi'dbi'r zakhodi v do regi'onal'nikh program energozberezheniya u mashinobuduvanni ta budi'vniczvi* / I.A. Dmitruk, R.J.Kogut, O.M. Pechenik ta i'nshi // *Vi'sn. nacz. tekhn. uni'v. «KhPI»*: sb. nauk.pr. - 2012. - Vip. 53(959). - S. 136-139.
3. Dmitruk I.A. *Zastosuvannya metodologi'yi upravli'nnya proektami dlya pi'dvishhennya energoe'fektivnosti i'nnovaczi'jnikh vari'ativnikh sistem* / I.A.Dmitruk, O.M.Krasnoshtan, R.J.Kogut, O.M. Pechenik // *Ekon. vi'sn. nacz. gi'mich. uni'v.: naukovo-teor.ta i'nfor.- praktich. zhurn.* - 2012. - Vip.2. - S. 97-101.
4. Dmitruk I.A. *Sitemnaya klassifikacziya stroitel'ny'kh i mashinostroitel'ny'kh innovaczi'j dlya primeneniya pri raschetakh e'konomicheskikh, e'nergeticheskikh i e'kologicheskikh pokazatelej e'fektivnosti* / I.A.Dmitruk, R.J.Kogut, A.N. Pechenik i dr. // *Komun. gospod. mi'st: naukovo-tekh. zbi'mik*. - 2011. - Vip.106. - S. 133-139.
5. Dmitruk I.A. *Zastosuvannya principu'v vari'ativnosti, transformnosti, rezervuvannya ta kompleksnoyi optimi'zaczi'yi pri viri'shenni zavdan energozberezheniya i energoe'fektivnosti* / I.A. Dmitruk, R.J.Kogut, O.M. Pechenik ta i'nshi // *Komun. gospod. mi'st: naukovo-tekh. zbi'mik*. - 2012. - Vip.107. - S. 484-490.
6. Dmitruk I.A. *Sintez polnogo mnozhestva obshhikh struktur sposobov povysleniya e'nergoe'fektivnosti proizvodstva* / Dmitruk I.A., Kogut R.J., Pechenik A.N. i drugie. // *Komun. gospod. mi'st: naukovo-tekh. zbi'mik*. - 2012. - Vip.109 - S. 96-106.
7. Pechenik O.M. *Modeli vikoristannya ta zberezheniya energi'yi na promislovikh pi'dpriyemstvakh / Suchasni problemi nauki ta osviti: materi'ali 12-yi Mi'zhnarodnoyi mi'zhdiscipli'narmoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi'yi 30 kvi'tnya - 9 travnya 2011, m. Alushta.-Kharkiv, «Ukrayins'ka asoczi'aczi'ya «Zhi'nki v nauczii ta osviti»*. Kharkiv's'kij nacz. un-t i'm. V.N.Karazi'na. 2011, - S. 71-72.
8. Dmitruk I.A. *Ispol'zovanie tekhnologij e'nergoberezheniya, variativnosti i iskusstvennogo intellekta v avtomobilestroenii i avtomobil'nom khozajstve Ukrainy* / I.A. Dmitruk, R.J. Kogut, A.N. Pechenik i dr. // *Materialy Pervoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii «Sovershenstvovanie e'kspluataczionny'kh svojstv transportny'kh mashin»*. - Surgut, 2012. - S. 44-47.
9. Zemlyachenko O.I. *Vikoristannya vari'ativnikh sistem yak energozberi'gayuchikh zasobi'v* / O.I.Zemlyachenko, R.J.Kogut, O.M.Pechenik ta i'nshi // *Suchasni problemi gumani'zaczi'yi ta garmoni'zaczi'yi upravli'nnya. Materi'ali 10-yi Mi'zhnarodnoyi mi'zhdiscipli'narmoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi'yi* /

- Kh, «Ukrayins'ka asoczi'aczi'ya «Zhi'ntsi v nauczii ta osviti'»». Kharkiv's'kij naciz. un-t i'm. V.N.Karazi'na. 2012, - S. 147-148.
10. Pechenik A.N. *Sisteme viri'shennya zadach energoberezhennya na pidpriyemstvakh promislivosti'.* / O.N.Pechenik, R.J.Kogut, M.E.Ternyuk // Suchasni` problemi nauki ta osviti: materi`ali Mi`zhnarodnoyi mi`zhdiscipli`namoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi 27 kvi`tnya – 9 travnya 2010, m. Alushta, «Ukrayins'ka asoczi'aczi'ya «Zhi'ntsi v nauczii ta osviti'»». Kharkiv's'kij naciz. un-t i'm. V.N.Karazi'na. s. 124.
 11. Ternyuk M.E. *Zabezpechennya granichno visokoyi ekonomichnoyi efekтивности` regi`onal'nikh program energoberezhennya na etapi` priyattya proektnikh ri'shen`* / M.E.Ternyuk, R.J.Kogut, O.M.Pechenik, V.G.Sal'nikov // Nova tema. #2 (31). 2012. S. 48-50.
 12. Pechenik A.N. *Adaptivny`j podkhod k regulirovaniyu sootnoshenij «e`ffekt/zatraty» u potrebitelej i predpriyatij, izgotavluyushchikh e`nergoberegayushchuyu tekhniku dlya zhelezny`kh dorog* / A.N. Pechenik, O.S .Bukreeva, A.V.Belovol i dr. // Vi`snik ekonomiki transportu i` promislivosti` (zbi`rnik naukovo - praktichnikh statej) Vipusk 50, - 2015. - S.259-266.
 13. Ternyuk N.E. *Osnovy` kompleksnoj avtomatizaczi tekhnologicheskikh sistem dlya proizvodstva zubchatikh kolez: dis. ... doktora tekhn.. nauk: 05.02.08* / Ternyuk Nikolaj E`mmannuilovich. – Kh., 1983. – 433 s.
 14. Ternyuk I.A. *Primenenie diskretno-kontinual'ny`kh 3D-modelej klasterov blokiryushchikh konturov pri proektirovanii tekhnologicheskikh marshrutov obrabotki lopatok monokoles kompressorov i turbin GTD* [Tekst] / I. A. Ternyuk, V. F Sorokin // Otkryty`e informacziynny`e i komp'yuterny`e integrirovanny`e tekhnologii:. – Kh.: NAKU “KhAI”, 2016. – #72. – S. 249 – 259.

Поступила (received) 15.05.2020

About the Authors / Відомості про авторів / Сведения об авторах

Bilovol Hanna (Біловол Ганна Володимирівна, Беловол Анна Владимировна) – PhD (Engineering), Associate Professor of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport; Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-099-008-92-08; e-mail: annabel731@gmail.com; ORCID iD 0000-0001-6168-5216;

Komar Sergii (Комар Сергій Володимирович, Комар Сергей Владимирович) – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Construction and Mitsnost of Literary Machines and Engines, Kharkiv National University of the Republic of Uzbekistan Ivana Kozheduba; Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-099-008-92-08; e-mail: annabel731@gmail.com; ORCID iD 0000-0002-8961-2614;

Vasilenko Oleg (Василенко Олег Вадимович, Василенко Олег Вадимович) – PhD (Engineering), Senior Lecturer of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport; Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-067-39-66-747; e-mail: 0673966747@ukr.net; ORCID iD 0000-0002-6770-0955;

Panchuk Oleksii (Панчук Олексій Вікторович, Панчук Алексей Викторович) – Senior Lecturer of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport; Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-066-41-56-959; e-mail: pan4uk_81@ukr.net; ORCID iD 0000-0002-0852-1543;

Rukavishnikov Pavlo (Рукавишников Павло Володимирович, Рукавишников Павел Владимирович) – Senior Lecturer of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian State University of Railway Transport; Kharkiv, Ukraine; tel.: +38-099-569-30-59; e-mail: rukavishnikov@gmail.com; ORCID iD 0000-0002-9670-3071.

КОСТИК К. О., АКИМОВ О. В., ОСТРОВЕРХОВА К. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ З КУСКОВИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ШИХТИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ СТАЛІ 35Л

У роботі виконані розрахунки і дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т при виплавці залізо-вуглецевого сплаву, а саме: проведений аналіз електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунки параметрів ІТП; визначені основні геометричні розміри ІТП, параметри системи індуктор-завантаження; визначені основні електромагнітні параметри печі, такі як потужність, необхідна мінімальна робоча частота джерела живлення, опір завантаження індуктора, коефіцієнт корисної дії, число витків індуктора та ін.; отримані залежності настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму; розглянуті принципи дії, циркуляція залізо-вуглецевого сплаву в ІТП, представлена математична модель параметрів печі з кусковим завантаженням шихти при початковій температурі, яка враховує електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігрівуючих і розплавляючих метал; частоту струму мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу, неоднорідність властивостей металу, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки вуглецевої сталі 35Л. В роботі встановлена залежність розмірів кускової шихти і число витків індуктора від частоти струму; отримана залежність робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки від розмірів кускової шихти сталі 35Л, що є найважливішим фактором, який визначає якісні показники індукційної тигельної печі та забезпечує ефективний нагрів шихти і плавки за короткий проміжок часу.

Ключові слова: індукційна тигельна піч, кускова шихта, вилівок, потужність, частота струму, індуктор.

КОСТИК Е. А., АКИМОВ О. В., ОСТРОВЕРХОВА К. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С КУСКОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ 35Л

В работе выполнены расчеты и исследования электромагнитных параметров индукционной тигельной печи вместимостью 4,5 т при выплавке железо-углеродного сплава, а именно: проведен анализ электромагнитного влияния на расплавление металла и расчеты параметров ИТП; определены основные геометрические размеры ИТП, параметры системы индуктор-загрузка; определены основные электромагнитные параметры печи, такие как мощность, необходимая минимальная рабочая частота источника питания, сопротивление загрузки индуктора, коэффициент полезного действия, число витков индуктора и др.; полученные зависимости настила тока, полной мощности системы «индуктор-металл» и силы тока в индукторе от частоты тока; рассмотрены принципы действия, циркуляция железо-углеродистого сплава в ИТП, представлена математическая модель параметров печи с кусковым загрузкой шихты при начальной температуре, которая учитывает электромагнитное воздействие, что вызывает наведение вихревых токов в металле, разогревающих и расплавляющих металл; частоту тока питающей сети, физические свойства расплавленного металла, неоднородность свойств металла, кусковой характер загрузки печи в начальный период плавки углеродистой стали 35Л. В работе установлена зависимость размеров кусковой шихты и число витков индуктора от частоты тока; получена зависимость рабочей частоты генератора для индукционной литейной установки от размеров кусковой шихты стали 35Л, что является важнейшим фактором, который определяет качественные показатели индукционной тигельной печи и обеспечивает эффективный нагрев шихты и плавки за короткий промежуток времени.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, кусковая шихта, отливка, мощность, частота тока, индуктор.

KOSTYK K. O., AKIMOV O. V., OSTROVERKHOVA K. V.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF INDUCTION CRUCIBLE FURNACE WITH LUMP LOADING OF CHARGE FOR 35L STEEL SMELTING

In the work of calculations and study of electromagnetic parameters of the induction crucible furnace with a capacity of 4.5 t in the smelting of iron-carbon alloy, namely the analysis of the electromagnetic influence on molten metal and calculations of ICF; it also defines main dimensions of ICF, the parameters of the system inductor-load; identifies the main electromagnetic parameters of the furnace such as power, the required minimum operating frequency of the power source, the resistance of the inductor, the efficiency, the number of turns of the inductor, etc.; the dependences of flooring is current, the full power of the system "inductor-metal" and the current in the inductor from the frequency of the current; the principles of operation, circulation of the iron-carbon alloy in ICF, the mathematical model parameters of the furnace with lump loaded at an initial temperature, which takes into account electromagnetic effects, which causes the guidance of eddy currents in the metal, warming and melt metal; the frequency of the supply network current, the physical properties of the molten metal, the heterogeneity of the metal properties, the lumpy nature of the furnace loading during the initial melting period of 35L carbon steel. The paper establishes the dependence of the size of the lump charge and the number of turns of the inductor on the current frequency; the dependence of the operating frequency of the generator for an induction foundry on the size of the lump charge of 35L steel is obtained, which is the most important factor that determines the quality indicators of the induction crucible furnace and provides effective heating of the charge and melting in a short period of time.

Keywords: induction crucible furnace, lump charge, casting, power, current frequency, inductor.

1. Вступ. На сучасному етапі розвитку промисловості, науки, техніки і технології з'явилися передумови якісного стрибка на новий рівень з появою нових матеріалів, що володіють унікальними властивостями. Використання нових матеріалів в різних сферах пов'язано з розробкою нових технологій, що дозволяють забезпечити достатню продуктивність при високій якості продукції. Електротермічні установки є однією з найбільш поширених груп і знаходять застосування в різних областях промисловості, сільському господарстві,

медицині, харчовій промисловості та побуті. Електротермічні процеси пов'язані з перетворенням електричної енергії в теплову з перенесенням теплової енергії всередині тіла або з одного обсягу в інший за законами теплопередачі. Нагрівання різних тіл, матеріалів, рідин, газів; перехід їх з одного агрегатного стану в інший може бути здійснено з використанням електротермічних установок різного виду. В даний час одним з найбільш перспективних методів плавки металів є плавка в індукційних тигельних печах (ІТП). У ньому поєднується

контрольований термічний вплив на розплавлений метал з електромеханічним впливом, що викликає інтенсивне перемішування металу в тиглі. Протягом тривалого часу проводилися спроби удосконалення ІТП. По-перше, для збільшення ефективності плавки і термічного ККД установки було запропоновано живити даний агрегат струмами середньої і підвищеної частоти, збільшуючи тим самим питому потужність установки в порівнянні з варіантом живлення від джерел промислової частоти. По-друге, робилися спроби управління рухом розплаву різними способами. Таким чином, ІТП є агрегатом подвійної дії – високоефективною плавильною установкою з можливістю управління рухом розплаву для отримання рівномірного розподілу домішок (легуючих добавок) в процесі плавки. Для аналізу електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунку параметрів і інтегральних характеристик ІТП необхідно мати модель, що враховує весь комплекс впливів, а саме: електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігрівуючих і розплавляючих нагрівасмий метал; тепловий вплив, що полягає у формуванні заданої картини температурного поля в ІТП; гідродинамічний вплив, що впливає в значній мірі на технологічні параметри плавки. Математична модель також повинна враховувати схеми включення обмоток індуктора, частоту мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу і сплавів, неоднорідність властивостей металу і футеровки по радіусу і осі індуктора печі, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основою будь-якого індукційного пристрою є індуктор, який створює електромагнітне поле з заданими параметрами в обсязі, зайнятому провідним завантаженням (вторинним елементом). Тип пристрою визначається видом і властивостями вторинного елемента. Велику групу складають пристрої з провідним дисперсним або дрібнокусовим вторинним елементом. Індуктор виконує відповідну технологічну операцію шляхом електромеханічного впливу на провідні частинки. Сюди ж можна віднести і індукційну тигельну піч (ІТП) на початковій стадії роботи, коли здійснюється індукційний нагрів завантаження, що складається з окремих провідних шматків шихти [1–2]. Режим роботи установок індукційного нагріву складних складових заготовок подібні режимам роботи ІТП на початковому етапі плавки, що дозволяє використовувати загальний математичний апарат для опису теплофізичних і електромагнітних процесів в завантаженні цих пристроїв зі зміщенням акценту від інтегральних параметрів індуктора до більш докладного розгляду поля в завантаженні [3]. При цьому необхідно мати уявлення про процеси, що відбуваються в завантаженні, розташованій в різних зонах установки, і, по можливості, управляти цими процесами. При нагріванні заготовки важливо забезпечити рівномірність розподілу температур по перетину, що складно реалізувати при нагріванні в пульсуючому полі. Елементи складової заготовки знаходяться в

полі рівної напруженості і відповідно мають однакову потужність тепловиділення, але тепловіддача від периферійних елементів вище, що і призводить до зазначеної нерівномірності температурного поля. Застосування в даному випадку обертового або біжучого поля може вирішити зазначену проблему.

Другу групу складають пристрої, в яких здійснюється як термічний так і електромеханічний вплив на металевий розплав. Сюди в першу чергу слід віднести магнітогідродинамічні насоси, призначені для перекачування рідкого металу в технологіях лиття заготовок [4]. Вони повинні переважно відповідати заданим вимогам по витрата-напірним характеристикам, а також за умовами роботи, перш за все з точки зору нагріву обмотки індуктора. Також сюди можна віднести різні перемішувачі, задіяні в технологіях отримання сплавів і перемішувачі металів у процесі кристалізації [5]. До цієї ж групи пристроїв відносяться ІТП з рідкометалічним завантаженням [6] і плавильні агрегати на їх основі. Електромагнітні процеси в рідкому металі, що заповнює тигель на етапі розплавлення і перегріву, істотно відрізняються від процесів з кусковим завантаженням. На цьому етапі індуктор здійснює і термічне, і силовий вплив на метал. У цьому випадку ІТП дозволяє вирішувати спеціальні металургійні завдання – управління фізико-хімічними процесами на кордоні між шлаком і металом або ж вводяться в метал легувальні або збагачуючі речовини, між металом та матеріалом футеровки, між речовинами різної щільності і різних фізико-хімічних властивостей [4–7].

Як видно, ІТП на різних стадіях роботи об'єднує обидві групи розглянутих індукційних пристроїв. Сучасний підхід до розгляду ІТП як багатофункціонального плавильного агрегату передбачає використання останнього для різних технологічних завдань, а саме – не тільки для розплавлення шихти, але і для перемішування металу перед розливанням, тобто виконання функцій міксера. Плавка металу в ІТП, крім розплавлення кускової шихти, передбачає ще й управління фізико-хімічними процесами між металом і шлаком, взаємодією між металом і футеруванням тигля і іншими процесами.

ІТП може мати як один індуктор, що поєднує кілька функцій, так і кілька індукторів, що виконують різні функції. При поєднанні функцій електротермічного і електромеханічного впливу на розплав індуктор виконується багатосекційним, що дозволяє створити в робочому просторі печі біжуче уздовж осі індуктора магнітне поле. При застосуванні різних схем живлення секцій індуктора можна отримати різне співвідношення біжучої і пульсуючої складових електромагнітного поля в тиглі. Для здійснення спеціальних технологічних процесів в ІТП часто потрібно створити крім біжуче уздовж осі, яке обертається навколо осі тигля, електромагнітне поле. Індуктор обертача може розташовуватися як під днищем печі так і навколо бічної поверхні тигля. При розташуванні обертача під днищем печі змінюється співвідношення розмірів тигля щодо класичної конструкції печі в бік зменшення співвідношення висоти і діаметра тигля, що може вплинути на

енергетичну ефективність «гріючого» бічного індуктора. У ряді випадків індуктор обертача може розміщуватися навколо бічної поверхні у верхній частині тигля або нижньої його частини [7]. Розроблені конструкції «електромагнітних циклонів», індуктори яких набираються з декількох лінійних індукторів з біжучим полем або з декількох індукторів з обертовим полем, струми яких зміщені в тимчасовій і просторовій областях на певний кут для створення обертів і бігу складових поля відповідно. Наведений огляд конструкцій ІТП охоплює лише конструкції з тиглем циліндричної форми. У ряді випадків тигель виконується з листового металу плоским або квадратним в перерізі. Конструктивно така ІТП наближається до циклону, але має лише 2 або 4 індуктора відповідно з незалежним живленням [5]. При такій конструкції можна проводити нагрів і перемішування металу як в поздовжньому так і в поперечному полі, створюваному індукторами.

3. Мета дослідження. Визначення та дослідження електромагнітних параметрів індукційної плавильної установки місткістю 4,5 т для виплавки залізо-вуглецевого сплаву.

4. Виклад основного матеріалу. В роботі проводилися дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т для виплавки вуглецевої сталі 35Л. Середньовуглецева лита сталь 35Л без термообробки зазвичай має ферито-перлітну структуру з відманштеттовим (орієнтованим) розподілом фериту і наявністю феритної сітки по межах колишніх аустенітних зерен. Застосування високотемпературної нормалізації або нормалізації з подальшим поліпшенням дозволяє значно подрібнити ферит, ліквідувати його орієнтованість, зменшити загальну неоднорідність структури [8]. Найбільш активно сталь 35Л використовується в машинобудуванні і будівництві. Саме тут повною мірою затребувані її основні властивості: твердість; податливість до обробки. Основна сфера застосування – це виробництво виливків станин для прокатних станів, зубчастих коліс, бігунків і тяг, засувки і балансирів, діафрагм, катків, валків, кронштейнів, інших деталей, що приводяться в дію середніми статичними і динамічними навантаженнями; виливків деталей газових, парових, гідравлічних турбін, осевих компресорів, що працюють при граничних температурах від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$; виливків деталей 1 і 3 груп для трубопровідної арматури, приводних пристроїв з граничною температурою робочого середовища в діапазоні $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ без обмеження робочого тиску; виливків деталей для гірничо-металургійного обладнання; виливків 3 групи для авіабудування по виплавлюваних моделях – герметичних корпусів приладів, високонавантажених кронштейнів, стабілізаторів, рам гіроскопів і II групи-фланців, колекторів, негерметичних корпусів приладів, сполучних деталей та ін.

В вісесиметричній постановці однорідний металевий циліндр поміщений в кільцевий провідник, по якому протікає індукційний струм. Осьовий розмір циліндра дорівнює осьовому розміру індуктора.

Напруженість магнітного поля спрямована уздовж осі циліндра; за умови нескінченної протяжності системи (відсутні крайові зони, в яких форма силових ліній магнітного поля змінюється) і при осьовій симетрії (вісь металевих циліндра збігається з віссю кільцевого індуктора) напруженість поля всередині циліндра залежить тільки від координати R . Це ж відноситься і до напруженості електричного поля [9]. Магнітний потік проходить по самій шихті, тому для роботи печі мають велике значення магнітні властивості, а також розміри і форма шматків шихти. Величини індукції, напруженості магнітного поля і вихрового струму, наведеного в шматках шихти, будуть відрізнятися від величин, визначених за допомогою вищеприведеного методу. Між шматками шихти на початковій стадії плавки немає суцільного контакту, контактний опір між шматками шихти набагато більше внутрішнього опору самого шматка, крім того, між шматками існують повітряні проміжки, створюють додаткові шляхи для магнітного потоку, тому картина розподілу напруженості магнітного поля буде наближатися до картини напруженості в порожньому індукторі. Протягом плавки ця картина буде постійно змінюватися зі зміною властивостей шматків шихти, а, отже, буде змінюватися і внутрішній опір завантаження печі, що призводить до постійної зміни режиму роботи печі протягом плавки при інших рівних умовах (незмінна величина і частота струму індуктора) [6].

Коли в якості шихти застосовують феромагнітні метали, то до того моменту, поки їх температура ще не досягла точки Кюрі, тобто $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, їх магнітна проникність зберігає свою величину. В цьому випадку шихта буде грати роль не тільки вторинної обмотки і навантаження, але і незамкнутого сердечника. Інакше кажучи, при плавці в печі без сердечника феромагнітних металів розігрів шихти в перший період (до точки Кюрі) відбудеться не тільки за рахунок тепла, що виділяється від циркуляції в ній вихрових струмів, а й за рахунок втрат на перемагнічування, яке в цей період спостерігається в шихті. Після точки Кюрі феромагнітні тіла втрачають свої магнітні властивості, і робота індукційної печі стає аналогічною роботі повітряного трансформатора, тобто трансформатора без сердечника. Розрахунок параметрів індуктора при нагріванні кускової шихти заснований на складанні схеми заміщення індуктора з кусковим завантаженням (в загальному випадку феромагнітної) за методом, викладеним в роботі [6]. Зміни стосуються розрахунку опору завантаження і заміни параметрів розплаву на параметри шихти.

Кускова шихта в першому наближенні може бути представлена у вигляді сукупності еквівалентних циліндрів, розташованих вертикально в тиглі, причому діаметр циліндрів чисельно дорівнює характерному розміру середнього шматка шихти $d_{\text{ш}}$, а висота їх дорівнює розрахунковій висоті завантаження h_2 . Передбачається, що електричний контакт між окремими еквівалентними циліндрами відсутній.

Процес плавки кускового завантаження в індукційній тигельній печі (ІТП) без залишкової

емності можна розбити на кілька етапів, під час яких властивості шматків шихти змінюються в значній мірі, що безумовно відбивається на інтегральних параметрах ІТП, зокрема, на активному і реактивному опорах навантажувального контуру:

- нагрівання шматків шихти від початкової температури до температури зміни магнітних властивостей (точки Кюрі);
- нагрівання шматків від точки Кюрі до температури плавлення;
- розплавлення дрібної кускової шихти до утворення рідкого шару з плаваючими в ньому твердими шматками шихти;
- перехід в рідку фазу всього обсягу металу в тиглі;
- досипка холодного металу в тигель до номінальної маси завантаження печі і доведення температури в печі до температури розливання.

У початковий момент часу завантаження печі являє собою сукупність відокремлених один від одного (в електричному відношенні) шматків металу. Перехідний електричний опір контакту між окремими шматками багато більше внутрішнього електричного опору самого шматка. Слід зазначити, що під внутрішнім опором шматка розуміється електричний опір індукційно підведеному струму певної частоти з урахуванням поверхневого ефекту [6].

Найчастіше в ІТП, що працюють з кусковим завантаженням, розмір шматка незрівнянно малий в порівнянні з внутрішнім діаметром тигля, отже, розглядаючи завантаження цілком, в межах одного шматка шихти величину магнітного потоку можна вважати незмінною. Структура кусковий завантаження ІТП є невпорядкованою, шихта являє собою різномірний набір геометричних тіл (відрізки металевих профілів, скручена дріт, спресована стружка), що має лише регламентований розмір «середнього діаметра шматка шихти», який є визначальним при виборі частоти, на якій працює піч або рекомендований для застосування на даній частоті. При моделюванні завантаження ми змушені від невпорядкованої структури перейти до впорядкованої, замінивши шматок неправильної геометричної форми шматком, який можна надалі легко описати математично.

Усереднений шматок шихти вважається ізотропним, тобто має одні і ті ж властивості незалежно від обраного напрямку. Цій характеристиці усередненого шматка шихти відповідає металева куля. Завантаження ІТП рідко являє собою набір об'єктів з правильною геометричною формою, яку слід було б враховувати при моделюванні, тому для опису усередненого шматка, скористаємося об'єктом, в якому при падінні плоскої хвилі справедливий рівняння, записані для циліндра. Для спрощення опису електромагнітних процесів можна використовувати осьову симетрію печі, коли магнітні потоки проходять лише в осьовому і радіальному напрямках, а також відомий підхід заміни шихтового завантаження набором довгих циліндрів, розташованих всередині тигля в осьовому напрямку [9]. Усереднений шматок шихти при цьому можна

представити у вигляді умовного об'єкта, що володіє ізотропією властивостей тільки в двох напрямках- нормальному (напрямку, перпендикулярному осі тигля) і тангенціальному (відповідно, по осі тигля). Циліндр, що має ту ж масу, щільність, питомий електричний опір, що і усереднений шматок шихти. Вісь цього розрахункового циліндра при розрахунках завжди збігається з напрямком магнітного потоку, для якого проводиться обчислення магнітного опору шматка.

Складова магнітного потоку $\Phi\tau$, яка спрямована паралельно осі тигля; складова магнітного потоку Φn спрямована відповідно радіусу. Якщо скористатися вищеописаним допущенням, електромагнітні процеси в окремому шматку шихти можна описати за відомою методикою [9–10].

В результаті проведених операцій отримаємо модель печі з кусковим завантаженням при початковій температурі. В процесі плавки температура в різних зонах печі різна; розплавлений метал накопичується в нижній частині тигля печі, тоді як у верхній – залишається відносно холодним. Отримана модель не має принципових обмежень на зміну властивостей як по верствам, так і по ділянках робочої області. Такі величини як питомий електричний опір або магнітна проникність можна задати вручну або автоматично як по тій, так і по іншій координаті, ввівши додатково в модель відповідні матриці розподілу по шарах і ділянках того чи іншого параметра. Також в моделі можна задати частину завантаження, представлену у вигляді неспікшихся шматків шихти, а іншу частину ("болото") – як розплавлений метал, моделюючи тим самим весь процес плавки в індукційній тигельній печі.

Для вищеописаної моделі користувалися допущенням, що опір контакту між окремими шматками великий, і струм, наведений в кільці шихти, зневажаючи малий. Однак, при сплаві окремих шматків, опір контакту між шматками значно падає і вплив струму кільця на картину розподілу магнітного поля по перетину вторинного елемента стає переважаючим [10].

Для опису нової моделі введемо наступну термінологію:

- циліндр-магнітопровід-металевий циліндр, що імітує окремий шматок завантаження, орієнтований підставою перпендикулярно потоку, що пронизує циліндр;

- циліндр-електропровід-металевий циліндр, що імітує окремий шматок завантаження, орієнтований підставою перпендикулярно електричному струму, що проходить через циліндр.

Відповідно до виділених вище режимів роботи печі розглянемо наступні етапи зміни структури і властивостей завантаження.

- Магнітна холодна шихта представлена елементарними циліндрами-магнітопроводами, що мають розміри шматків шихти і проводять магнітні потоки в кожному n-м кільці виділеного x-го шару в радіальному і осьовому напрямках. Магнітний опір кільця цим потокам визначається як паралельне

з'єднання магнітних опорів циліндрів в кільці. Циліндри-електропроводи, суміщені з циліндрами-магнітопроводами, орієнтовані при цьому в кільцевому напрямку. В цілому вони створюють кільцевий електропровід, опір якого складається з паралельно включених внутрішніх опорів циліндрів, а також послідовно включених (уздовж кільця) внутрішній опір циліндрів і стількох же опорів контакту між цими циліндрами.

- При немагнітній холодній шихті структура завантаження залишається такою ж, тобто включення магнітних і електричних опорів циліндрів не змінюється, але змінюється магнітна проникність матеріалу циліндрів.

- У міру нагрівання завантаження змінюється питома електропровідність гарячої шихти, але її структура і схема заміщення також не змінюються.

- Циліндри-електропроводи гарячої шихти з'єднуються між собою малим контактним опором, утворюючи кільцевий електропровід x -го шару з опором. Структура циліндрів-магнітопроводів залишається колишньою.

- Метал завантаження перетворюється в однорідний розплав. Розрахунок електромагнітних процесів зводиться до дослідження електромагнітного поля в провідному циліндрі, діаметр якого дорівнює внутрішньому діаметру тигля.

Активна потужність печі є частиною загальної потужності, що підводиться до агрегату і виділяється безпосередньо в садку. Вона залежить від необхідної продуктивності, часу нагріву і тепломісткості металу при температурі розливання. Плавка сталі проводиться без рафінування, режим роботи-на твердій завалці. Час плавки дорівнює 1,5 год з урахуванням тривалості розливання і завантаження 10 хв. Шихта складається з сталевих брухт, діаметр шматків шихти від 0,03 до 0,07 м, приймаємо для подальших розрахунків середній діаметр шматків шихти $d_{ш} = 0,05$ м. Корисна потужність ІТП визначається за виразом [6]:

$$P_{пол} = qG / (3,6t_{пл}), \text{ Вт}, \quad (1)$$

де q – теплотісткість розплавленого металу або сплаву при температурі розливання, Дж/кг; G – ємність печі, т; $t_{пл}$ – час плавки, год.

Якщо відома ентальпія c_p металу або сплаву при температурі розливання, то корисна потужність ІТП визначається за виразом [6]

$$P_{пол} = c_p G / t_{пл}, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Для подальших розрахунків приймаємо $P_{пол} = 1200$ кВт, теплові втрати $\Delta P_m = 82,5$ кВт (6,875 % від корисної потужності). Сумарні теплові втрати становлять 5–35 % корисної потужності печі, причому менша цифра відноситься до печей більшої ємності. Термічний ККД (η_m) індукційної тигельної печі зазвичай становить 75–95 % і визначається за виразом:

$$\eta_m = P_{пол} / (P_{пол} + \Delta P_m). \quad (3)$$

Після визначення орієнтовної потужності пічної установки і вибору частоти струму проводиться підбір джерела живлення.

В роботі проведений розрахунок і вибір робочої частоти джерела живлення ІТП і ефективність плавки кускової шихти різного розміру. Для вибору частоти і потужності джерела живлення і для наступних розрахунків приймемо варіант, при якому забезпечуються мінімально прийнятні умови нагріву, з урахуванням розміру кускової шихти $d_{ш} = 0,03 - 0,07$ м отримана залежність частоти від розмірів кускової шихти, яка представлена на рис. 1.

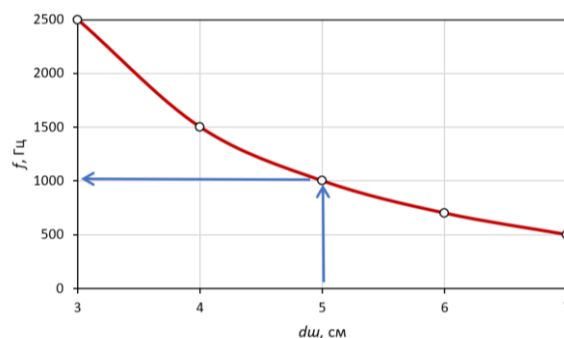


Рис. 1 – Залежність робочої частоти генератора від розмірів кускової шихти

Порівнюючи ефективність і якісні показники ливарних індукційних установок, необхідно представляти яка з них найкращим чином підходить для лиття сплаву, що володіє певними фізико-хімічними властивостями і лінійними розмірами. В теорії індукційного нагріву існує поняття «мінімально допустимої робочої частоти генератора» для заданого діаметра циліндричної заготовки, що підлягає нагріванню.

З наведеного графіка видно, що:

- мінімально допустимий розмір кускової шихти $d_{ш}$ сталі 35Л при роботі індукційної установки з частотою 2500 Гц дорівнює 3 см.

- мінімально допустимий розмір кускової шихти $d_{ш}$ сталі при роботі індукційної установки з частотою 500 Гц дорівнює 7 см.

Тобто, при роботі на ливарній установці з частотою 500 Гц обмежується можливість використання в якості «вторинного металу» елементів ливникової системи, що мають менші розміри. У разі ж їх використання вони будуть нагріватися не під дією індукційних струмів, а внаслідок передачі їм теплової енергії від більш гарячих частин завантаження тигля, що мають більший розмір. Це сприятиме збільшенню часу плавки, тобто погіршення одного з основних параметрів.

Графік на рис. 1 показує, що для нагріву кускової шихти розміром порядку 5 см, необхідна частота генератора не менше 1000 Гц. Якщо ж використовується кускова шихта розміром 4 см, то мінімально допустима частота генератора зростає до 1500 Гц.

Таким чином, вибір робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки є найважливішим фактором, що визначає її якісні показники.

Для забезпечення ефективного нагріву шихти і плавки за короткий проміжок часу, приймаючи середнє значення розміру кускової шихти $d_{ш} = 0,05$ м, згідно отриманої залежності (рис. 1) вибираємо частоту $f = 1000$ Гц.

В основі розрахунку електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі покладені закономірності поглинання електромагнітних хвиль в металі [6]. Активна потужність, що виділяється в металі, визначена за виразом:

$$P_M = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{M,P} k_{mp}^2, \text{ кВт} \quad (4)$$

де $k_{M,P}$ – поправочний коефіцієнт активної потужності, що враховує кривизну бічної поверхні садки нагрівається матеріалу і залежить від відносини середнього діаметра тигля і глибини проникнення струму в ньому; k_{mp} – повний коефіцієнт магнітного розсіювання:

$$k_{mp} = k'_{mp} + \Delta k_{mp}, \quad (5)$$

де k'_{mp} – коефіцієнт магнітного розсіювання. Значення цього коефіцієнта визначається за даними [1] як функція співвідношень. Приймаємо $k'_{mp} = 0,9563$.

$$\Delta k_{mp} = \frac{3}{4} \left(1 / \left(\frac{D_2}{\Delta_3} - 1 \right) \right), \quad (6)$$

Настил струму $(I\omega) = H_u$ знаходимо з виразу, в якому відомі всі величини

$$I\omega = \frac{400}{k_{mp}} \sqrt{\frac{P_M}{D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{MP}}}, \quad (7)$$

де P_M – потужність, що виділяється в металі, кВт.

На рис. 2 показана отримана залежність настилу струму від частоти. Активна потужність, що втрачається в індукторі, становить:

$$P_H = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_1 a_1 \sqrt{\rho_H f} \cdot k_{HP} \frac{1}{k_3}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

де k_{HP} – поправочний коефіцієнт активної потужності, що враховує кривизну індуктора; k_3 – коефіцієнт заповнення індуктора $k_3 = 0,7 \dots 0,9$.

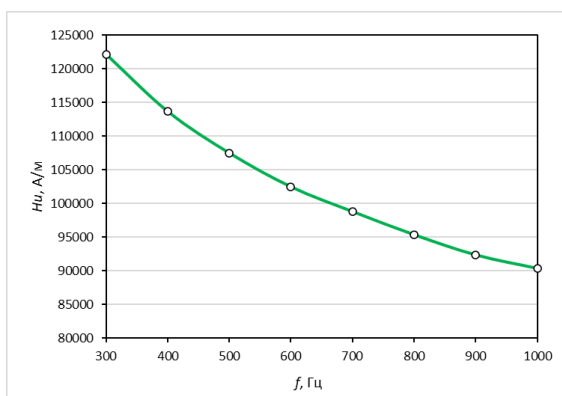


Рис. 2 – Залежність настилу струму від частоти

Реактивна потужність, що виникає в металі, дорівнює, кВт·А,

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{M,Q} k_{mp}^2, \quad (9)$$

де $k_{M,Q}$ – поправочний коефіцієнт реактивної потужності, що враховує кривизну індуктора.

Реактивна потужність, що виникає в зазорі між індуктором і тиглем, становить, кВт·А,

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega)^2 f \cdot D_2^2 a_2 \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (10)$$

Реактивна потужність, що виникає в індукторі, дорівнює, кВт·А,

$$Q_H = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_1 a_1 \sqrt{\rho_H f} \cdot k_{HQ} \frac{1}{k_3}, \quad (11)$$

Підставивши отримане значення настилу струму в індукторі визначаємо значення активних і реактивних потужностей P_u , Q_M , Q_3 , Q_u , а також сумарну активну $P_{u.n.}$, кВт, реактивну $Q_{u.n.}$, кВт·А, і повну потужність S , споживану установкою. Визначаємо загальні активну, реактивну і повну потужність системи «індуктор-метал» та величину струму в індукторі:

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{U_H} \text{ А}$$

На рис. 3 представлені отримані залежності повної потужності S системи «індуктор-метал» і сили струму I в індукторі від частоти струму f .

Проведений розрахунок електричних параметрів системи індуктор-завантаження. Визначивши електричні параметри системи індуктор-завантаження, більш точно розрахований електричний ККД індуктора та число витків індуктора. Встановлену кількість витків індуктора розміщують рівномірно по його висоті. Зазор між витками заповнюють електричною ізоляцією, товщину якої приймають з розрахунку 10-40 В на 1 мм товщини ізоляції. Мінімальна товщина ізоляції не повинна бути менше 1,5 - 2,0 мм.

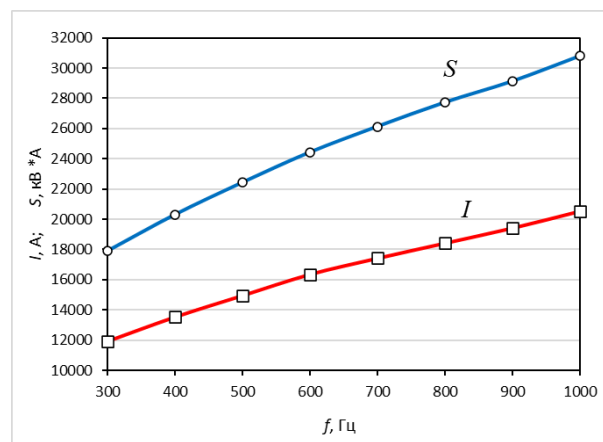


Рис. 3 – Залежність повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму

Залежність розмірів кускової шихти, що завантажується в піч для виплавки сталі, і число витків індуктора N від частоти f , показана на рис. 4.

В індукційних нагрівальних установках реактивна потужність досить велика, а, отже, $\cos \varphi$ дуже низький. Тому в установках такого типу для компенсації реактивної передбачають включення в

електричну піч батареї конденсаторів, ємність якої вибирають з умов резонансу ланцюга піч-конденсатори з частотою струму живлення.

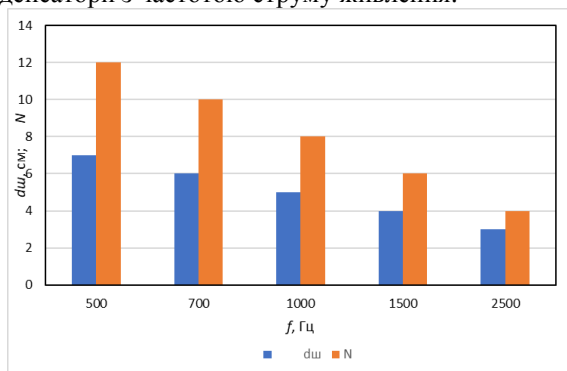


Рис. 4 – Гістограма розмірів кускової шихти $d_{ш}$ і числа витків індуктора N від частоти f

Батареї складають з конденсаторних банок, частина з яких постійно підключена до індуктора, а частина включена через комутуючі пристрої – ці банки підключаються в міру необхідності для підстроювання коливального контуру в резонанс при зміні параметрів завантаження під час нагрівання [6].

Визначимо необхідну кількість конденсаторних банок, а також електричних втрат в конденсаторах. Реактивна потужність конденсаторної батареї (з урахуванням недовикористання банок по напрузі), необхідна для компенсації $\cos\varphi$ установки до $\cos\varphi_u$ (при живленні від ТПЧ $\cos\varphi_u \approx 0,6$), визначається за виразом:

$$Q_{к.б.} = P_n (tg\varphi - tg\varphi_k) \frac{U_{б.н.}^2}{U_u^2} k_{б.}, \text{ вар}, \quad (12)$$

де P_n – потужність, що підводиться до індуктора, Вт; $k_{б.}$ – загальний коефіцієнт запасу (1,1–1,3); $tg\varphi$ – «природний» коефіцієнт реактивної потужності; $tg\varphi_k$ – коефіцієнт потужності, відповідний $\cos\varphi_k$ скомпенсованого коливального контуру; $U_{б.н.}$ – номінальна напруга конденсаторних банок, В; U_u – напруга на індукторі, В. До розрахунку приймаємо $U_{к.б.} = 1000$ В.

Ємність конденсаторної батареї визначаємо за виразом

$$C_{к.б.} = \frac{Q_{к.б.}}{2\pi f U_u^2}, \text{ Ф}. \quad (13)$$

При застосуванні додаткового виведення на індукторі для можливості підвищення напруги з метою підтримати потужність печі при зміні параметрів металу в процесі плавки, щоб напруга на індукторі не перевершувало номінальної напруги конденсаторів, можливо два варіанти:

а) використовувати напругу перетворювача 750 В, а конденсатори на 1500 В;

б) вибрати напругу перетворювача 1500 в, конденсатори на 1000 В, з'єднані попарно послідовно.

Для досліджуваної установки вибираємо другий варіант з напругою на індукторі $U_u = 1000$ В, конденсаторами типу ЕСВ на 500 або 1000 В з

соволовою ізоляцією, з'єднаних попарно послідовно. Перетворювач частоти в перший період приєднується до крайніх витків індуктора, а після втрати магнітних властивостей – до такого числа витків, при якому напруга на полюсах індуктора не перевищить 1500 В.

Після зміни параметрів шихти і втрати магнітних властивостей перетворювач підключається до витків індуктора, напруга на індукторі дорівнюватиме 1500 В, а струм, що протікає по ньому, складе 11961 А. Для такого підключення число витків складе 11 витків індуктора. Встановлене кількість витків індуктора розміщуємо рівномірно по його висоті. Зазор між витками заповнюють електричною ізоляцією, товщину якої приймають з розрахунку 10–40 В на 1 мм товщини ізоляції. Мінімальна товщина ізоляції не повинна бути менше 1,5–2,0 мм. Тоді ізоляційний проміжок між витками, задавши напругу на 1 мм зазору 20 в/мм, складе 5 мм. Таким чином, визначені основні характеристики індукційної тигельної печі, що отримані за результатами розрахунків.

Висновки. У роботі виконані розрахунки і дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т при виплавці залізо-вуглецевого сплаву, а саме: проведений аналіз електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунки параметрів ІТП; визначені основні геометричні розміри ІТП, параметри системи індуктор-завантаження; визначені основні електромагнітні параметри печі, такі як потужність, необхідна мінімальна робоча частота джерела живлення, опір завантаження індуктора, коефіцієнт корисної дії, число витків індуктора та ін.; отримані залежності настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму; розглянуті принципи дії, циркуляція залізо-вуглецевого сплаву в ІТП, представлена математична модель параметрів печі з кусковим завантаженням шихти при початковій температурі, яка враховує електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігрівуючих і розплавляючих метал; частоту струму мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу, неоднорідність властивостей металу, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки вуглецевої сталі 35Л.

В роботі встановлена залежність розмірів кускової шихти і числа витків індуктора від частоти струму; отримана залежність робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки від розмірів кускової шихти сталі 35Л, що є найважливішим фактором, який визначає якісні показники індукційної тигельної печі та забезпечує ефективний нагрів шихти і плавки за короткий проміжок часу.

Список літератури:

1. Долгополов А. Е. и др. Концепция создания современного литейного предприятия // Информация как двигатель научного прогресса. – 2018. – С. 115–119.
2. Sundus M.A., Akimov O., Kostyk K. Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery // Східно-

- Европейський журнал передових технологій. – 2017. – № 3/12 (87). – С. 30–37.
3. Simeiko K. V., Iliencko B. K., Sidorenko M. A. Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature technological processes // *Energy technologies & resource saving*. – 2019. – № 1. – С. 35–44.
 4. Швецов Л. В. История и перспективы развития литейного производства РУП "МоАЗ" // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 89–90.
 5. Шибаев Е. В., Кечин В. А. Перспективные технологии плавки и литья при изготовлении фасонных отливок // *Редакционная коллегия*. – 2019. – С. 123.
 6. Булгакова А. и др. Основы получения отливок из сплавов на основе железа. – Litres, 2019.
 7. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. Surface hardening of steel parts // *Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. Праць / Одес. політехн. ун-т. Одеса, 2017. – № 1(51). – С. 17–23.*
 8. Костик В. О. Исторические аспекты диаграммы железо-цементит // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 1 (3). – С. 17–19.
 9. Фаткуллин С. М., Сарапулов Ф. Н., Идиятулин А. А., Фризен В. Э. Одномерная динамическая модель индукционной тигельной печи // *Электротехника*. – 2010. – № 5. – С. 37–42.
 10. Лузгин В. И., Фризен В. Э., Черных И. В. Динамическая модель индукционной тигельной печи // *Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Вестник УГТУ-УПИ*. – Екатеринбург, 2003. – Ч. 2. – С. 163–166.
 3. Simeiko K. V., Iliencko B. K., Sidorenko M. A. *Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature technological processes* // *Energy technologies & resource saving*. – 2019. – 1. – P. 35–44.
 4. Shveczov L. B. *Istoriya i perspektivy` razvitiya litejnogo proizvodstva RUP` MoAZ`* [History and prospects of development of the foundry production of RUE "MoAZ"] // *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. – 2019. – 3. – P. 89–90.
 5. Shibaev E. V., Kechin V. A. *Perspektivny'e tekhnologii plavki i lit'ya pri izgotovlenii fasonny'kh otlivok* [Promising technologies of melting and casting in the production of shaped castings] // *Redakcionnaya kollegiya* [Editorial board]. – 2019. – P. 123..
 6. Bulgakova A. i dr. *Osnovy` polucheniya otlivok iz splavov na osnove zheleza* [Fundamentals of obtaining castings from iron-based alloys]. – Litres, 2019.
 7. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. *Surface hardening of steel parts* // *Praczi` Odes'kogo poli'tekhnichnogo uni'versitetu : zb. nauk. Praczi`* [Proceedings of the Odessa Polytechnic University: collection of Sciences. Labours] / Odes. politekh. un-t. Odessa, 2017. – № 1(51). – С. 17–23.
 8. Kostik V. O. *Istoricheskie aspekty` diagrammy` zhelezo-cementit* [Historical aspects of the iron-cementite diagram] // *Tekhnologicheskij audit i rezervy` proizvodstva* [Technological audit and production reserves]. – 2014. – 1 (3). – P. 17–19.
 9. Fatkullin S. M., Sarapulov F. N., Idiyatulin A. A., Frizen V. E`. *Odnomernaya dinamicheskaya model` indukcionnoj tigel'noj pechi* [One-dimensional dynamic model of an induction crucible furnace] // *E'lektrotekhnika* [Electrical Engineering]. – 2010. – 5. – P. 37–42.
 10. Luzgin V. I., Frizen V. E`, Cherny`kh I. V. *Dinamicheskaya model` indukcionnoj tigel'noj pechi* [Dynamic model of an induction crucible furnace] // *E'lektromekhanicheskie i e'lektromagnitny'e preobrazovateli e`nergii i upravlyaemy'e e'lektromekhanicheskie sistemy`*: Vestnik UGTU-UPI [Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled Electromechanical systems: Bulletin of UGTU-UPI]. – Ekaterinburg, 2003. – Ch. 2. – P. 163–166.

References (transliterated)

Поступила (received) 15.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костик Катерина Олександрівна (Костик Екатерина Александровна, Kostyk Kateryna Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-068-40-25-037; e-mail: Kateryna.Kostyk@khp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4139-9970

Акімов Олег Вікторович (Акимов Олег Викторович, Akimov Oleg Viktorovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-057-707-6-320; e-mail: Oleg.Akimov@khp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7583-9976

Островерхова Ксенія Віталіївна (Островерхова Ксения Витальевна, Ostroverkhova Kseniia Vitaliivna) – магістр кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-057-707-6-854; e-mail: ksusha.kitrum@gmail.com

СТЕПАНОВ М.С., ІВАНОВА Л. П., ЛИТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА М.С.

ОЦІНКА ТЕПЛООБМІНУ ПРИ СПІЛЬНІЙ ДІЇ СТРУМЕНІВ ПОВІТРЯ І ПОТОКУ ЗОР ПРИ ШЛІФУВАННІ

Одним з основних і перспективних методів підвищення продуктивності і якості обробки при шліфуванні є застосування удосконаленої техніки подачі ЗОР. Для практичного здійснення зазначених методів на виробництві розробляють і впроваджують різні пристрої подачі ЗОР в зону різання. У деяких пристроях для забезпечення відсутності контакту нагрітої ЗОР з деталями верстата створюють повітряну завісу, в результаті чого виникає комплексна теплова взаємодія струменів ЗОР і повітря. У даній статті розглянута схема передачі тепла на різних ділянках потоків ЗОР і повітря в пристрої подачі ЗОР. Запропоновано математичні моделі теплового балансу на цих ділянках і кількості теплоти, що виділяється з нагрітої ЗОР і відводиться струменями повітря. Наведені математичні залежності можуть бути використані при проектуванні техніки подачі ЗОР, яка забезпечує усунення можливості контакту нагрітої рідини з елементами верстата.

Ключові слова: пристрій подачі ЗОР, повітряний екран, газонасичена рідина, температура ЗОР, теплообмін.

СТЕПАНОВ М. С., ІВАНОВА Л. П., ЛИТОВЧЕНКО П. И., ИВАНОВА М.С.

ОЦЕНКА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ СТРУЙ ВОЗДУХА И ПОТОКА СОЖ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Одним из основных и перспективных методов повышения производительности и качества обработки при шлифовании является применение усовершенствованной техники подачи СОЖ. Для практического осуществления указанных методов на производстве разрабатывают и внедряют различные устройства подачи СОЖ в зону резания. В некоторых устройствах для обеспечения отсутствия контакта нагретой СОЖ с деталями станка создают воздушную завесу, в результате чего возникает комплексное тепловое взаимодействие струй СОЖ и воздуха. В данной статье рассмотрена схема передачи тепла на разных участках потоков СОЖ и воздуха в устройстве подачи СОЖ. Предложены математические модели теплового баланса на этих участках и количества теплоты, которое выделяется из нагретой СОЖ и отводится струями воздуха. Приведенные математические зависимости могут быть использованы при проектировании техники подачи СОЖ, которая обеспечивает устранение возможности контакта нагретой жидкости с элементами станка.

Ключевые слова: устройство подачи СОЖ, воздушный экран, газонасыщенная жидкость, температура СОЖ, теплообмен.

STEPANOV M. S., IVANOVA L. P., LITOVCHENKO P. I., IVANOVA M. S.

ASSESSMENT OF HEAT TRANSFER WITH THE COMBINED ACTION OF AIR JETS AND LIQUID COOLANT FLOW WHEN GRINDING

One of the main and promising methods for increasing productivity and processing quality during grinding is the use of advanced coolant supply technology. Various devices for supplying coolant to the cutting zone are developed and implemented for the practical realization of these methods in production. To ensure the absence of contact of the heated coolant with the grinding machine parts, an air curtain is created in some devices, as a result of which there is a complex thermal interaction of the coolant jets and air. This article discusses the heat transfer scheme for different sections of the coolant and air flows in the coolant supply device. Mathematical models of the heat balance in these areas and the amount of heat that is released from the heated coolant and removed by jets of air are proposed. The above mathematical dependences can be used in the design of the coolant supply technique, which eliminates the possibility of contact of the heated fluid with the elements of the machine tool.

Keywords: coolant supply device, air curtain, gas-saturated liquid, coolant temperature, heat transfer.

1. Вступ. Збільшення швидкості шліфувального круга та подачі викликає різку інтенсифікацію теплового режиму обробки і пов'язано з цим нагрівання ЗОР. Контакт нагрітої ЗОР з деталями та вузлами верстата є однією з причин їх температурних деформацій, які негативно впливають на параметри точності обробки. Зменшення теплового впливу на елементи верстата вимагає створення відповідної техніки подачі ЗОР в зону різання.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

За даними дослідників [1, 2], на теперішній час відомо більше 200 способів подачі ЗОР, особливості використання яких залежить від конструкції інструмента, режимів та схем обробки [3]. Удосконалення техніки застосування ЗОР вважається одним з найбільш перспективних напрямків підвищення продуктивності та якості процесу шліфування, який сприяє розширенню його технологічних можливостей [4, 5]. Тому, розробка і дослідження параметрів пристроїв для подачі ЗОР, що забезпечують підвищення точності шліфованих деталей, зменшення температурних деформацій деталей верстата, збереження властивостей ЗОР та

збільшення терміну її використання є актуальною науково-практичною задачею.

З цієї метою було розроблено пристрій [6], принцип роботи якого полягає в тому, що потік ЗОР попадає в сопло, далі, омиваючи заготовку, рухається до патрубку відведення ЗОР і виводиться в підсистему подачі та очищення ЗОР. Разом з тим, через канал подається стиснуте повітря, яке утворює роздільний екран, який запобігає витіканню та розприскування ЗОР по торцям пристрою.

Для розробленого пристрою [6] характерною є наявність ефектів, які забезпечують різні дії, серед яких можна виділити наступні:

- ізолюючий ефект, який дає можливість мінімізувати контакт нагрітої ЗОР з елементами верстата, зокрема зі шліфувальною бабкою;

- підтримуючий ефект, який сприяє зниженню пружних відтискань заготовки, що сприятливо позначається на параметрах точності шліфованих деталей.

Визначено фактори впливу струменя повітря на потік ЗОР в розробленому пристрої.

Крім того, в пристрої можуть проявлятися ряд дій, ефективність яких слід оцінити. Наприклад,

наскільки зменшиться температура повітря, яке створює ізолюючий екран на виході з сопел.

3. Мета дослідження. Визначення параметрів процесу теплообміну при шліфуванні деталей з використанням пристроїв подачі ЗОР, принцип дії яких полягає у створенні захисного повітряного екрану, що спричиняє виникнення теплових потоків від одночасної дії повітряних струменів та ЗОР.

4. Викладення основного матеріалу.

Зміна температури повітря на вході в пристрій і на виході в зазор можна визначити скориставшись формулою

$$n = \left(1 - \frac{\lg T_{\text{вих}} - \lg T_{\text{вх}}}{\lg \frac{p_{\text{вих}}}{p_{\text{вх}}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де $T_{\text{вих}}, T_{\text{вх}}, p_{\text{вих}}, p_{\text{вх}}$ – температура і тиск повітря на виході з зазору і на вході в пристрій; n – показник політропи.

Якщо наповнення (спорожнення) газової ємності відбувається через канал або отвір, в якому відсутній помітний теплообмін з зовнішнім середовищем, то показник політропи приймають $n = 1, 4$.

Приблизні розрахунки показують, що зниження температури повітря на виході із сопел в розробленому пристрої знаходяться в межах $0,5 \dots 1,5^\circ\text{C}$, що відповідає результатам ефекту Джоуля-Томсона для повітря $\alpha_{\text{if}} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{1}{4}^\circ\text{C}/(\text{кг}\cdot\text{см}^2)$.

Параметр α_{if} характеризує швидкість зміни температури у рівнянні

$$T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}} = \int_{p_{\text{вх}}}^{p_{\text{вих}}} \alpha_{\text{if}} dp_i. \quad (2)$$

Очевидно, що теплообмін від різних ділянок поверхні заготовки різний і слід враховувати характер розподілу коефіцієнта тепловіддачі в площині, перпендикулярній лінії контакту, що раніше було зроблено [7-9].

Крім того, характер теплообміну може змінюватися і вздовж лінії контакту [10]. Це пояснюється наявністю ділянок, на яких охолодження зони різання здійснюється повітряним, газорідним або рідинним струменями. Для точного визначення тепла, що передається із зони різання у ЗОР слід проаналізувати картину теплообміну в пристрої більш детально. Для цього проаналізовано схему передачі тепла на ділянках, розташованих в пристрої (рис. 1).

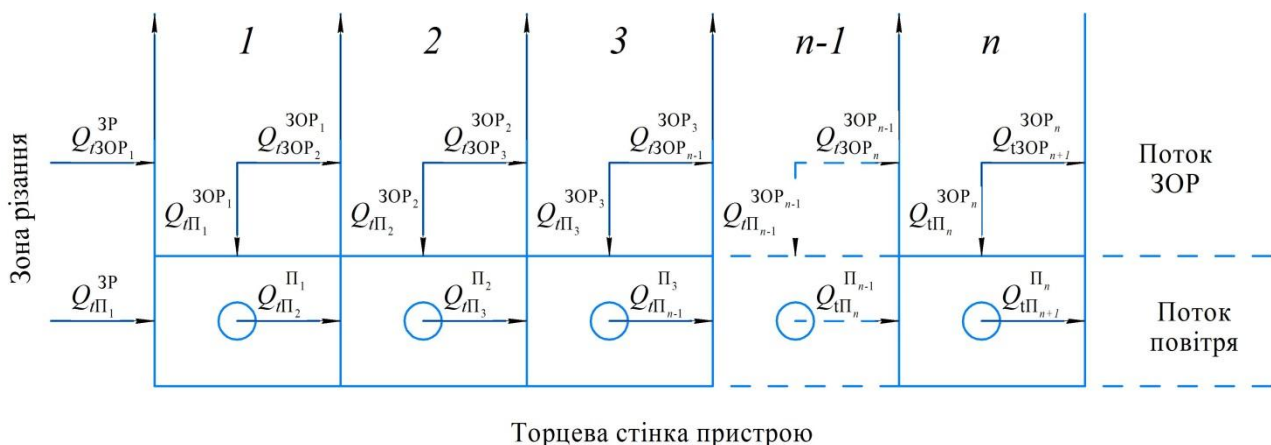


Рис. 1 – Схема передачі тепла на різних ділянках потоків ЗОР та повітря в пристрої подачі ЗОР

На схемі передачі тепла на ділянках потоків ЗОР і повітря в пристрої подачі ЗОР введено такі позначення: $Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗОР}}, Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}$ – теплові потоки, що передаються із зони різання відповідно у ЗОР та у повітря (ділянка 1); $Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗОР}}, Q_{\text{ЗОР}_{n-1}}^{\text{ЗОР}}$ – теплові потоки, що передаються в ЗОР від 1-ої до n-ої ділянки; $Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}, Q_{\text{П}_n}^{\text{ЗОР}}$ – теплові потоки, що передаються від ЗОР у повітря на 1-ій, n-ій ділянках відповідно; $Q_{\text{П}_2}^{\text{П}}, Q_{\text{П}_{n-1}}^{\text{П}}$ – теплові потоки, що передаються в ЗОР від 1-ої до n-ої ділянки. Кількість ділянок відповідає числу повітряних сопел, а довжина ділянок дорівнює відстані між осями сопел.

Для ділянки 1 тепловий баланс має вигляд

$$Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗОР}} = Q_{\text{ЗОР}_2}^{\text{ЗОР}} + Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}. \quad (3)$$

Звідки, тепло, яке передається від 1-ої ділянки потоку ЗОР до 2-ої

$$Q_{\text{ЗОР}_2}^{\text{ЗОР}} = Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗОР}} - Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}. \quad (4)$$

Для ділянки 1 повітряного потоку тепловий баланс має вигляд

$$Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}} = Q_{\text{П}_2}^{\text{П}} - Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}. \quad (5)$$

Звідки, тепло, яке передається від 1-ої ділянки потоку повітря до 2-ої

$$Q_{\text{П}_2}^{\text{П}} = Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}} - Q_{\text{П}_1}^{\text{П}}. \quad (6)$$

Тепло, що передається від ЗОР до повітря на 1-ій ділянці

$$Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}} = Q_{\text{П}_2}^{\text{П}} - Q_{\text{П}_1}^{\text{ЗОР}}. \quad (7)$$

З іншого боку, тепло, що передається на цій же ділянці

$$Q_{\text{дп}_1}^{\text{ЗОР}_1} = Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗР}} - Q_{\text{ЗОР}_2}^{\text{ЗОР}_1} \quad (8)$$

Після перетворення можна отримати тепло, що передається в ЗОР від зони різання до n -ої ділянки потоку

$$Q_{\text{ЗОР}_{n+1}}^{\text{ЗОР}_n} = Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗР}} - Q_{\text{дп}_1}^{\text{ЗОР}_1} - Q_{\text{дп}_2}^{\text{ЗОР}_2} - Q_{\text{дп}_3}^{\text{ЗОР}_3} - Q_{\text{дп}_{n-1}}^{\text{ЗОР}_{n-1}} - Q_{\text{дп}_n}^{\text{ЗОР}_n}$$

$$\text{або} \quad (9)$$

$$Q_{\text{ЗОР}_{n+1}}^{\text{ЗОР}_n} = Q_{\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗР}} + Q_{\text{дп}_1}^{\text{ЗР}} - Q_{\text{дп}_{n+1}}^{\text{П}_n}$$

Обдув зони різання потоком повітря недостатньо ефективний, а потужність теплового джерела може знизитися на 2...3% [11]. Це показала оцінка охолодження поверхні, що шліфується, потоками повітря, які циркулюють навколо кола. Це пов'язано з невисокою теплопровідністю повітря і малим температурним напором.

У запропонованому пристрої потоки повітря, що генеруються кругом у зону контакту, практично не проникають. У цю зону може потрапляти повітря, яке виривається з сопел, що створюють повітряний екран на торцях.

Для кожної ділянки внутрішньої поверхні пристрою слід визначити параметри теплообміну. Для потоку повітря наведемо наступні.

Як відомо, процеси конвективного теплообміну досліджують, головним чином, експериментально, а коефіцієнт тепловіддачі визначають за допомогою критерію подібності за формулою

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_d}, \quad (10)$$

де Nu – критерій Нуссельта; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К); l_d – визначальний розмір, м.

Для визначення Nu можна скористатися формулою, отриманою при обтіканні циліндра поперечним потоком повітря

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

де Re – число Рейнольдса, $Re = (5 \dots 10) 10^5$; c , n – коефіцієнт та показник степені, які залежать від числа Рейнольдса, $c = 0,197 \dots 0,81$, $n = 0,6 \dots 0,4$; ε – поправочний коефіцієнт, що враховує ступінь турбулентності набігаючого потоку, $\varepsilon = 1 \dots 16$.

Для системи застосування ЗОР при шліфуванні природною є наявність газової складової. Параметри газовмісту при цьому визначається структурою і конструктивними особливостями технологічної системи [12].

Для ділянок, з наявністю газової складової, характерне наступне: повітря в ЗОР знаходиться у механічній суміші, причому в залежності від розмірів бульбашок суміш володіє певною стійкістю. При наявності в ЗОР нерозчиненого повітря її в'язкість збільшується. Зміна в'язкості може визначатися за формулою

$$\frac{\mu_{\Pi}}{\mu_0} = 1 + k_{\Pi} \cdot b_{\Pi}, \quad (12)$$

де μ_{Π}, μ_0 – в'язкість ЗОР з бульбашками та без відповідно; b_{Π} – вміст повітря, %; k_{Π} – емпіричний коефіцієнт, $k_{\Pi} = 0,015$ для вуглеводневих ЗОР.

При підведенні повітря на ділянці, що розглядається, може утворитися піна для якої є характерним те, що на границі з повітряним прошарком розмір бульбашок більший, ніж в глибині потоку ЗОР. Водоповітряна суміш потоку ЗОР зменшує змащувальну дію, проте значно зростає охолоджуюча дія, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі.

Для ділянок зони контакту можна припустити що для кожної області поверхні

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= v_{\alpha 1} \frac{m_1 \cdot c}{\Delta T_1 \cdot F_1}, \\ \alpha_2 &= v_{\alpha 2} \frac{m_2 \cdot c}{\Delta T_2 \cdot F_2}, \\ &\dots, \\ \alpha_i &= v_{\alpha i} \frac{m_i \cdot c}{\Delta T_i \cdot F_i}, \end{aligned} \quad (13)$$

$v_{\alpha 1}, v_{\alpha 2}, \dots, v_{\alpha i}$ – швидкість охолодження 1-ї, 2-ї, i -ї ділянок відповідно; $m_1, m_2, \dots, m_i$ – маса 1-ї, 2-ї, i -ї ділянок відповідно, c – теплоємність матеріалу заготовки; $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_i$ – різниця температур поверхні та середовища для 1-ї, 2-ї, i -ї ділянок відповідно; $F_1, F_2, \dots, F_i$ – площа 1-ї, 2-ї, i -ї ділянок охолоджуваної поверхні.

Відведення тепла пропорційний масі ділянки, що охолоджується [13].

$$\Delta Q_t = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c \cdot v_{\alpha i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Delta T_i \cdot F_i. \quad (14)$$

Суміш повітря з рідиною можна розглядати у вигляді гомогенного середовища, щільність якого близька до щільності рідини, а термодинамічні параметри визначаються через газовмісткість рідини. При цьому, кількість тепла, відведена на кожній конкретній ділянці, визначається за формулою

$$\Delta Q_t = G_i \cdot \Delta i_i, \quad (15)$$

де G – масові витрати; Δi_i – зміни ентальпії середовища.

Зміна ентальпії середовища визначається за формулою

$$\Delta i = c_p \cdot \Delta T_j, \quad (16)$$

де ΔT_j – зміна температури середовища в результаті підведення тепла.

Параметри ЗОР залежать від газовмісту, наприклад:

- щільність середовища

$$\rho = \rho_{\text{ЗОР}}(1 - \varphi) + \rho_{\Pi} \varphi, \quad (17)$$

де $\rho_{\text{ЗОР}}, \rho_{\Pi}$ – щільність ЗОР та повітря відповідно; φ – об'ємний газовміст;

- ентальпія

$$i = i_{\text{ЗОР}}(1 - x) + i_{\Pi} x, \quad (18)$$

де $i_{\text{ЗОР}}, i_{\text{П}}$ – ентальпія ЗОР та повітря відповідно;
 x – масовий газовміст, що визначається

$$x = \frac{\rho_{\text{П}} \varphi}{\rho_{\text{ЗОР}}(1 - \varphi) + \rho_{\text{П}} \varphi}.$$

Відносну щільність можна визначити з урахуванням режиму течії ЗОР по формулі

$$\rho_{\text{відн}} = 1 - k_{\text{е}} \cdot \text{Re}, \quad (19)$$

де $\rho_{\text{відн}}$ – відносна щільність двофазної рідини, яка дорівнює відношенню щільності двофазної рідини до щільності ЗОР при температурі 20 °C; $k_{\text{е}}$ – коефіцієнт в'язкості; Re – число Рейнольдса.

Коефіцієнт в'язкості $k_{\text{е}}$ залежить від в'язкості рідини і може бути визначений за формулою

$$k_{\text{е}} = f_{\lambda} \cdot \nu, \quad (20)$$

де f_{λ} – коефіцієнт пропорційності, для вуглеводневих ЗОР $f_{\lambda} = 0,0055$; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Ефективність охолодження потоку ЗОР обдувом струменями повітря, яке виривається з сопел, залежить від відносних швидкостей ЗОР і повітря.

Кількість тепла, відведеного повітрям від потоку ЗОР

$$Q_{\text{П1}} = Q_{\text{П}} \cdot \rho_{\text{П}} \cdot c_{\text{П}} \cdot (T_{\text{П}}^{\text{вих}} - T_{\text{П}}^{\text{вх}}), \quad (21)$$

де $Q_{\text{П1}}$ – кількість тепла, що відводиться з ділянки потоком повітря; $Q_{\text{П}}$ – витрати повітря; $\rho_{\text{П}}, c_{\text{П}}$ – щільність та питома теплоємність повітря відповідно; $T_{\text{П}}^{\text{вих}}, T_{\text{П}}^{\text{вх}}$ – температура повітря на виході та вході в ділянку відповідно.

Кількість тепла, що виділяється із потоку ЗОР

$$Q_{\text{ЗОР1}} = Q_{\text{ЗОР}} \cdot \rho_{\text{ЗОР}} \cdot c_{\text{ЗОР}} \cdot (T_{\text{ЗОР}}^{\text{вих}} - T_{\text{ЗОР}}^{\text{вх}}), \quad (22)$$

де $Q_{\text{ЗОР1}}$ – кількість тепла, що відводиться потоком ЗОР на ділянці; $Q_{\text{ЗОР}}$ – витрати ЗОР; $\rho_{\text{ЗОР}}, c_{\text{ЗОР}}$ – щільність та питома теплоємність ЗОР відповідно; $T_{\text{ЗОР}}^{\text{вих}}, T_{\text{ЗОР}}^{\text{вх}}$ – температура ЗОР на виході та вході в ділянку відповідно.

Висновки. Таким чином, зменшення температурних деформацій за рахунок керування тепловим станом ЗОР є важливим засобом поліпшення точностних параметрів шліфувальних верстатів. Причому, це можна здійснити за рахунок вдосконалення технології подачі ЗОР в зону різання, що має велике значення для підвищення ефективності шліфування. Наведені залежності можуть бути використані при проектуванні техніки подачі ЗОР, яка забезпечує усунення можливості контакту нагрітої рідини з елементами верстату.

Список літератури:

1. Василенко О.А. Улавливающее действие СОЖ при шлифовании и оценка его эффективности / О.А. Василенко, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – Южноуральск: ЮУрГУ, 2016. – Т. 16, № 4. – С. 59–66.
2. Степанов Ю.С. Обзор основных способов подачи СОЖ при шлифовании периферией круга / Ю.С. Степанов, Ю.В. Василенко // Орловский государственный технический

- университет. Орел, 1999. 42. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 15.12.99, № 3701-B99.
3. Василенко О.А. Эффективность действия СОЖ при шлифовании / О.А. Василенко, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2016. – Вып. 8, Ч. 1. – С. 215–219.
4. Ефимов, В.В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании / В.В. Ефимов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. – 142 с.
5. Худобин, Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства. Справочник / Л.В. Худобин и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
6. Патент на кор. мод. № 136095 Україна, МПК(2019.01), B24B 55/00. Пристрій подачі мастильно-охолоджувальної рідини / Степанов М.С., Літовченко П.І., Котляр О.В., Іванова М.С., Іванова Л.П., Басова Є.В.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ». – № у 2018 11969; заявл. 03.12.18; опуб. 12.08.19, Бюл. № 15.
7. Степанов М. С. Теплообмін при шліфуванні з застосуванням ЗОР / М.С. Степанов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2002. – Вип. 19. – С. 62–67.
8. Степанов М. С. Определение влияния гидравлических параметров подачи СОЖ на коэффициент теплоотдачи в зоне резания при шлифовании / М.С. Степанов // Вестник НТУ «ХПІ». – Харків, 2001. – Вип. 10. – С. 168–172.
9. Сизый Ю. А. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга / Ю.А. Сизый, М.С. Степанов // Восточно-европейский журнал передовых технологий, – 2004. – № 2. – С. 52 – 63.
10. Степанов М. С. Дослідження процесу теплообміну в зоні шліфування при використанні спеціального пристрою подачі МОП / М.С. Степанов, М.С. Іванова та ін. // Сучасні технології у промисловому виробництві : Матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). – Суми : Сумський державний університет, 2020. – С. 59–60.
11. Лебедев В. Г. Некоторые особенности шлифования деталей оборудования атомной энергетики / В. Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С. 78–75.
12. Степанов М. С. Оценка газосодержания СОЖ при шлифовании / М.С. Степанов, Д. В. Ходоков // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. – Ульяновск, 1992. – С. 16–22.
13. Макаров С. С. Управление теплообменом при струйном воздушном охлаждении / С.С. Макаров, В.Б. Дементьев // Химическая физика и мезоскопия. – 2007. – Т9, № 4. – С. 370–376.

References (transliterated)

1. Vasilenko O.A. Ulavlivaushchee dejstvie SOZh pri shlifovanii i ocenka ego jeffektivnosti [The capture action of coolant during grinding and evaluation of its effectiveness] / O.A. Vasilenko, A.V. Tjuhta, Ju.V. Vasilenko // Vestnik JuUrGu. Serija «Mashinostroenie». – Juzhnoural'sk: JuUrGu, 2016. – T. 16, № 4. – pp. 59–66.
2. Stepanov Ju.S. Obzor osnovnyh sposobov podachi SOZh pri shlifovanii periferiej kruga [An overview of the main methods of supplying coolant when grinding the periphery of the wheel] / Ju.S. Stepanov, Ju.V. Vasilenko // Orlovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. Orel, 1999. 42. – Rus. – Dep. v VINITI 15.12.99, № 3701-V99.
3. Vasilenko O.A. Jefferktivnost' dejstvija SOZh pri shlifovanii [The effectiveness of the coolant during grinding] / O.A. Vasilenko, A.V. Tjuhta, Ju.V. Vasilenko // IzvestijaTulGU. Tehničeskienauki. – Tula, 2016. – Vyp. 8, Ch. 1. – pp. 215–219.
4. Efimov, V.V. Nauchnye osnovy tehnik podachi SOZh pri shlifovanii [Scientific fundamentals of grinding coolant technology] / V.V. Efimov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1985. – 142 p.
5. Hudobin, L.V. Smazочно-ohlazhdajushhie tehnologičeskie sredstva. Spravochnik [Lubricating and cooling technological means. Handbook] / L.V. Hudobin i dr. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 544 p.
6. Patent na kor. mod. № 136095 Ukraїna, MPK(2019.01), V24V 55/00. Pristrij podachi mastil'no-oholodzhuval'noї ridini [Lubricating and coolant supply device] / Stepanov M.S.,

- Litovchenko P.I., Kotljars O.V., Ivanova M.S., Ivanova L.P., Basova E.V.; заявник і патентовласник Нав. техн. ун-т "ХПІ". – № у 2018 11969; заявл. 03.12.18; опуб. 12.08.19, Бюл. № 15.
7. Stepanov M. S. Teploobmin pri shlifuvanni z zastosuvannjam ZOR [Heat transfer during grinding with the use of coolant] / M.S. Stepanov // Visnik NTU «HPI». – Harkiv, 2002. – Vip. 19. – pp. 62-67.
 8. Stepanov M. S. Opredelenie vlijanija gidravlicheskih parametrov podachi SOZh na koeficient teplootdachi v zone rezanija pri shlifovanii [Determination of the influence of hydraulic parameters of the coolant supply on the heat transfer coefficient in the cutting zone during grinding] / M.S. Stepanov // Vestnik NTU «HPI». – Harkiv, 2001. – Vyp. 10. – pp. 168-172.
 9. Sizyj Ju. A. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo polja v shlifuemoj zagotovke periferiej kruga [Mathematical modeling of the temperature field in a grinding workpiece by the periphery of a wheel] / Ju.A. Sizyj, M.S. Stepanov // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, – 2004. – № 2. – S. 52 – 63.
 10. Stepanov M. S. Doslidzhennja procesu teploobminu v zoni shlifuvannja pri vikoristanni special'nogo pristroju podachi MOR [Investigation of the heat exchange process in the grinding zone using a special coolant supply device] / M.S. Stepanov, M.S. Ivanova ta in. // Suchasni tehnologij u promislovom virobnictvi : Materiali ta programa VII Vseukraïns'koï naukovo-tehnichnoï konferencij (m. Sumi, 21-24 kvitnja 2020 r.). – Sumi : Sums'kij derzhavnij universitet, 2020. – pp. 59-60.
 11. Lebedev V. G. Nekotorye osobennosti shlifovanija detalej oborudovanija atomnoj jenergetiki [Some features of grinding parts of nuclear power equipment] / V. G. Lebedev, N.N. Klimenko // Suchasni sistemi tehnologij u mashinobuduvanni. – Odesa: ONPU, 2015. – pp. 78-75.
 12. Stepanov M. S. Ocenka gazosoderzhanija SOZh pri shlifovanii [Assessment of gas content of coolant during grinding] / M.S. Stepanov, D. V. Hodokov // Smazочно-ohlazhdajushhie zhidkosti v processah abrazivnoj obrabotki. – Ul'janovsk, 1992. – pp. 16-22.
 13. Makarov S. S. Upravlenie teploobmenom pri strujnom vozdušnom ohlazhdenii [Air-cooled heat transfer control] / S.S. Makarov, V.B. Dement'ev // Himicheskaja fizika i mezoskopija. – 2007. – T9, № 4. – pp. 370-376.

Поступила (received) 14.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Larysa Ivanova) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>, тел.: (057) 720-66-25, e-mail: larisanangu@gmail.com.

Літовченко Петро Іванович (Литовченко Петр Иванович, Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри інженерної механіки, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: ivanovamaryna1@gmail.com.

ЗМІСТ

<i>Gasanov M., Permyakov A., Klochko A., Shelkovoy A.</i> New strength for recovery of geared circles.....	3
<i>Новиков Ф. В.</i> Зномерности управления упругими перемещениями в технологической системе при шлифовании	11
<i>Пермяков А.А., Юрчишин О.Я., Перминов Е.В., Шепелев Д.К.</i> Инновационные технологические направления для обеспечения стабилизации процесса обработки зубчатых реек	16
<i>Сергеев А. С.</i> Условия снижения температуры резания при внутреннем шлифовании.....	23
<i>Охрименко А.А., Грущина Е.А., Пивень Л.В., Скидан Н.П.</i> Технологические условия повышения степени упрочнения цилиндрических зубчатых колес	28
<i>Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Чайка Э.Г., Ушаков А.Н., Щербинина Т.Е.</i> Расчет и исследование статических и динамических характеристик электродвигателя привода вращения заготовки круглошлифовального станка.....	35
<i>Клочко А.А., Бабенко М.В., Юрьева М.В., Сюй Цюаньяо, Фу Хун</i> Влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических зубчатых колес	41
<i>Рузметов А.Р., Ушаков О.М.</i> Виявлення структури аналітичної залежності коефіцієнта інформаційної напруженості від параметрів технологічного середовища	47
<i>Клименко Г.П., Мироненко Е.В., Фадеев В.А., Заковоротный А.Ю., Ищенко Г.И.</i> Целевые функции представительства семейств критерий оптимизации блочно-модульного инструмента на тяжелых станках	55
<i>Березуцький В.В., Ільїнська О.І.</i> Новітні підходи до втілення ризик-орієнтованого підходу та удосконалення інструкції з охорони праці	65
<i>Bilovol A., Komar S., Vasilenko O., Panchuk O., Rukavishnikov P.</i> Ensuring maximum energy efficiency of working places on the basis of system energy audit	79
<i>Костик К.О., Акімов О.В., Островерхова К.В.</i> Дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі з кусковим завантаженням шихти для виплавки сталі 35Л.....	85
<i>Степанов М.С., Іванова Л. П., Літовченко П.І., Іванова М.С.</i> Оцінка теплообміну при спільній дії струменів повітря і потоку зор при шліфуванні	93

CONTENTS

<i>Gasarov M., Permyakov A., Klocho A., Shelkovoy A.</i> New strength for recovery of geared circles.....	3
<i>Novikov F.V.</i> Laws of control of elastic displacements in the technological system during grinding	11
<i>Permyakov A.A., Yurchishin O.Ya., Perminov E.V., Shepelev D.K.</i> Innovative technological areas to ensure stabilization of the process of processing gear racks	16
<i>Sergeev A. S.</i> Conditions for reducing the temperature of cutting during internal grinding.....	23
<i>Okhrimenko A.A., Grushchina E.A., Piven L.V., Skidan N.P.</i> Technological conditions for increasing the degree of hardening of cylindrical gears.....	28
<i>Sizyi Yu.A., Stalinsky D.V., Chaika E.G., Ushakov A.N., Shcherbinina T.E.</i> Calculation and study of the static and dynamic characteristics of a drive motor for rotating a workpiece of a circular grinding machine	35
<i>Klocho A.A., Babenko M.V., Yuryeva M.V., Xu Quaniao, Fu Hong</i> Influence of undulation parameters on operational properties of spur gears	41
<i>Ruzmetov A.R., Ushakov O.M.</i> Identification of the structure of the analytical dependence of the coefficient of information intensity on the parameters of the technological environment.....	47
<i>Klimenko G.P., Mironenko E.V., Fadeev V.A., Zakovorotny A.Y., Ischenko G.I.</i> Target functions of family representation, criterion of optimization of a block-modular tool on heavy machines	55
<i>Berezutsky V.V., Ilyinskaya O.I.</i> The latest approaches to the implementation of risk-based approach and improvement of labor protection instructions	65
<i>Bilovol A., Komar S., Vasilenko O., Panchuk O., Rukavishnikov P.</i> Ensuring maximum energy efficiency of working places on the basis of system energy audit	79
<i>Kostyk K.O., Akimov O.V., Ostroverkhova K.V.</i> Investigation of electromagnetic parameters of induction crucible furnace with lump loading of charge for steel smelting 35L	85
<i>Stepanov M.S., Ivanova L.P., Litovchenko P.I., Ivanova M.S.</i> Estimation of heat transfer at joint action of air streams and a stream of stars at grinding	93

ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В
МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць

№ 2'2020

Наукові редактори:	О. О. Пермяков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
	О. О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор:	О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар:	О. В. Набока, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khi.edu.ua

Підп. до друку 22.06.2020 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 23.
Ціна договірна

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
24800000000079553, від 16.05.2007 р.