

СББ станоктарындағы бұрандалы беттергі қалпына келтіру кезіндегі дірілдің себептерін талдау

¹**БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна**, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, t.buzauova@ktu.edu.kz,

^{1*}**ЕҢБЕК Дамир Жақсыбекұлы**, докторант, damiko_e@mail.ru,

²**ГАВРИЛИН Алексей Николаевич**, т.ғ.д., профессор, gawral@tpu.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

²Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ленин даңғылы, 30, Томск, Ресей, *автор-корреспондент.

Аңдатпа. СББ (сандық бағдарламамен басқарылатын) станоктарындағы дірілдер өңдеудің дәлдігі мен жабдықтардың қызмет ету мерзіміне әсер ететін маңызды фактор болып табылады. Атқарушы органдардың дәл қозғалысына жауап беретін жетек біліктерінің бұрандалы беттерін қалпына келтіру кезіндегі дірілді талдау ерекше маңызға ие. Басқарылмайтын, әрі бақыланбайтын дірілдер тетіктердің тез тозуына, бөлшектер сапасының төмендеуіне және жабдықтың тоқтап қалу уақытын ұзартады. Мақалада СББ станоктардың бұрандалы беттерін қалпына келтіру кезінде пайда болатын дірілдің себептері мен сипаттары қарастырылады. Балқытылып, механикалық өңделу арқылы қалпына келтірілген бұрандалы жұптар күшейтілген дірілді тудырады, бұл СББ станоктарының позициялау дәлдігін, беріктігін және өңдеу сапасын төмендетеді. Мәжбүрлі, өздігінен қозатын және акустикалық дірілдің көздеріне, олардың технологиялық және құрылымдық параметрлермен байланысына талдау жасалды. Қалпына келтіру кезіндегі материалдардың сәйкес келмеуіне, бұранда қадамының ауытқуына және құрылымдық ақаулардың әсеріне назар аударылды. Дірілді бақылауға және бұрандаларды қалпына келтіру әдістерін жетілдіруге, соның ішінде, материалдарды таңдауға және бұрандалардың геометриясын бақылауға кешенді көзқарас керек. Мақалада қарастырылған нәтижелер бұрандаларды қалпына келтіру дәлдігін жақсарту үшін және СББ жүйелеріндегі бұрандалы жұп ресурстарын арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілт сөздер: СББ станоктары, бұрандалы жұп, діріл, шарикті-бұрандалы жетектер.

Кіріспе. СББ жүйесімен жабдықталған станоктар оператор орнатқан өңдеу бағдарламасына сәйкес бөлшектерді автоматты түрде өңдейді. Металл кескіш станоктарда бағдарламалық басқаруды пайдалану өңдеу процестерін жоғары дәлдікте қайталануын қамтамасыз етеді, бұл әсіресе сериялық өндіріс үшін тиімді. Бұл станоктар түсінуге оңай және икемді параметрлерге ие, сонымен қатар, операторлардың жұмысын жеңілдеті келе, адам факторына байланысты өнімнің ақауын азайтады [1].

Станоктық құрал күймешегін және жұмыс органдарын жылжыту траекториясының дәлдігі бағыттаушылармен, ал позициялау дәлдігі шарикті – бұрандалы жетектермен қамтамасыз етіледі [2]. Заманауи СББ ста-

ноктарда қолданылатын бұндай жетектер 6 мкм дейінгі позициялау дәлдігін қамтамасыз етеді. СББ станоктарында өңдеу кезіндегі жоғары сызықтық жылдамдық, айналу жиілігі, жоғары кесу күштері және соққы жүктемелер осы жетектің бұрандалы беттерінің тозуына, серпіліс қозғалысына және дірілді тудырады, ал ол өңдеу сапасына әсер етеді. Осьтік күші (500 Н дейін) және айналу жылдамдығы (1000-1500 айн/мин) мәзірлерімен кесетін Bodor-C6 Lean металдарды газ және лазермен өңдеуге арналған СББ станок конструкциясында шарикті-бұрандалы жетектер арқылы ұзындығы 1 м болатын дайындама бойымен қозғалу қажет, жұмыс үздіксіз 800 жұмыс сағаты бойы орындалады, сондықтан жетектердің жұмысшы бұрандалы

беттерінде тозу (бұранда шыңдарының диаметрін 0,05 мм-ге тоздыру) және позициялау дәлдігі 0,1 мм-ге дейін төмендеуі байқалады.

Бұрандалы беттердің істен шығу себептерін талдайтын болсақ (кесте) СББ станоктарда бұрандалы жұптардың істен шығуы ақаулардың жалпы санының 72,34% құрайтыны анықталды [2].

Тозған бұрандалы беттер балқытылып, одан кейін механикалық өңдеумен қалпына келтіріледі. Қарағанды облысының машина жасау өндіріс-кәсіпорындарында (КЛМЗ) 2021-2024 жылдары орындалған ақау журналдарын сараптау барысында, қалпына келтіру операцияларын орындау кезіндегі «тетік пен кесу құрылғысы» жүйесіндегі тербелістерден туындаған ақаулар көп кездесетіні анықталды.

Зерттеу мақсаты – СББ станоктарында бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезіндегі дірілдің, яғни балқытылып, механикалық өңделген беттерді қалпына келтіру кезіндегі діріл себептерін зерттеу.

Негізгі мәселе – қалпына келтірілгеннен кейін діріл күшейіп, бөлшектердің қызмет ету мерзімі қысқарады, позициялау дәлдігі төмендейді. Себептері: қалпына келтіру кезіндегі технологиялық қателер (қадам ақаулары, материалдың сәйкес келмеуі және т.б.) және «құрал-дайындама» жүйесіндегі дірілдің ұлғаюы.

Зерттеу әдістемесі: Әдеби-дереккөздер мен техникалық құжаттаманы талдау: бұрандалы беттердің істен шығу себептері және оларды қалпына келтіру әдістері туралы ақпаратты жинау және жүйелеу; бұрандалы беттерді қалпына келтіру әдістеріне шолу; машина жасау кәсіпорындарының ақаулар жайлы журналдарын талдау.

Негізгі бөлім. СББ станоктардағы дірілдің негізгі көздері үш санатқа жіктеледі (1-сурет) [4]:

1. Мәжбүрлі дірілдер (айналдырықтың

дисбалансы, қалыпсыз беріліс және кесу аймағына салқындату-майлау сұйықтығын (СМС) беру кезіндегі кавитациялық құбылыстар);

2. Өздігінен қозатын дірілдер (кесу күштерінің өзгеруі, мойынтіректердегі үйкеліс);

3. Акустикалық резонанс (айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігі).

Мәжбүрлі дірілдер сыртқы күштердің әсерімен пайда болады және станоктың конструктивті немесе пайдалану кезіндегі ақауларымен байланысты, яғни, айналырлықтың дисбалансы, беріліс пен СМС пульсациясы, өңделетін тетіктердің эксцентриситеті

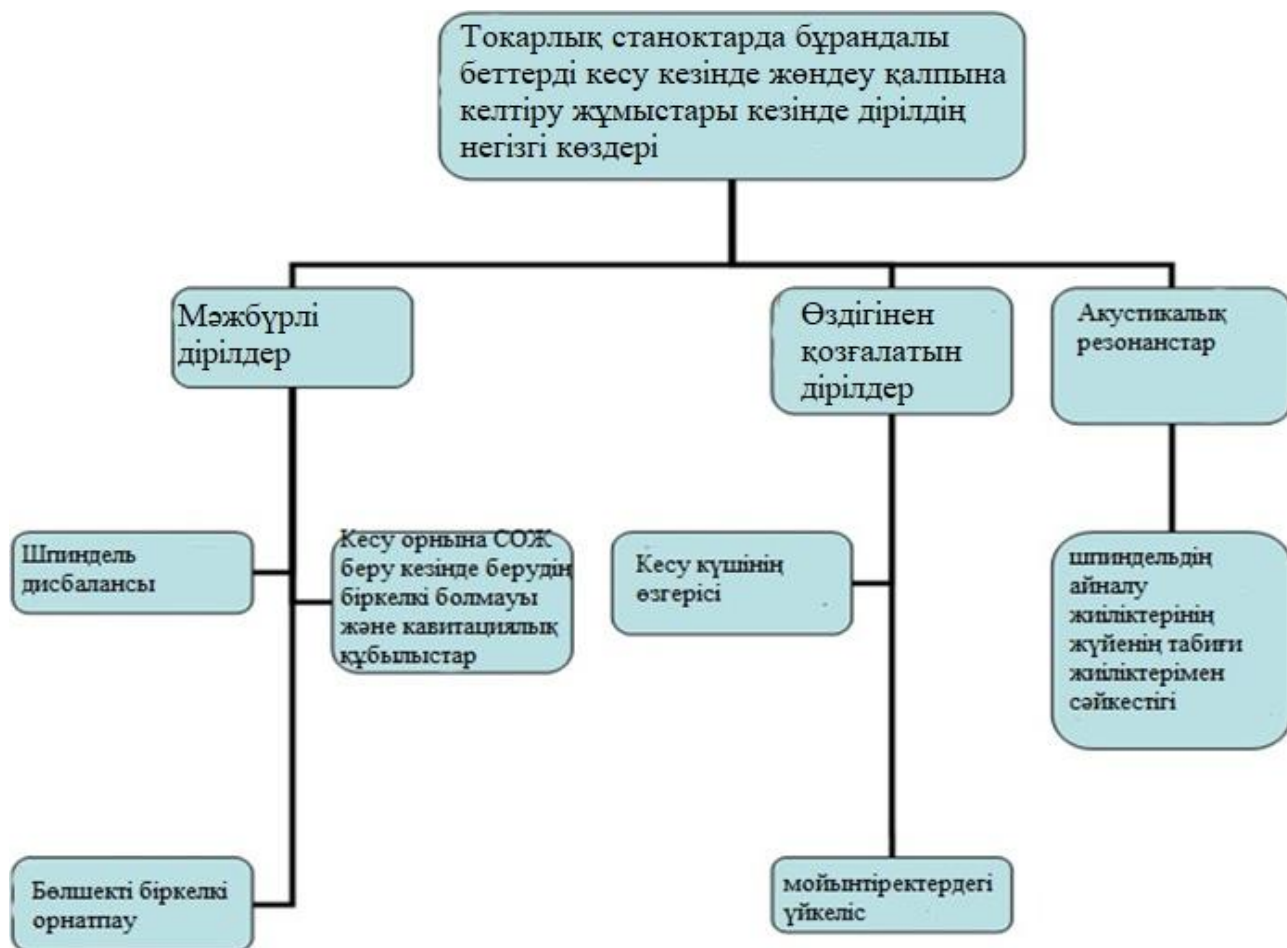
Айналырлық дисбалансы – айналатын элементтер осьтерінің сәйкес келмеуі (айналырлықтың 0,1 г·мм-ден асатын теңгерімсіздігі) центрден тепкіш күштерді тудырады. Центрден тепкіш күштер айналырлықтың айналу жиілігіне тең жиіліктегі дірілдерге әкеледі. [3] аталғандай, рұқсат етілген нормадағы 5% деңгейіндегі теңгерімсіздік дірілдің амплитудасын 12-15%-ға арттырады.

Берілістің және СМС пульсациясы немесе каретканың үзілісті қозғалысы (мысалы, жетек белдемелерінің тозуына байланысты) 2-4 октава диапазонында дірілді тудырады. [4] авторлар жүрісті бұранда қадамының 0,01 мм-ден жоғары ақауы жүйеде резонанс тудыратыны аталған. Тәжірибелік зерттеулерде кесу тереңдігі 2 мм көп және айналырлықтың жылдамдығы 1500 айн/мин-ден жоғары болғанда кавитация ұлғаятыны анықталған. Мысалы, 40ХН маркалы болатты $\varnothing = 180$ мм/мин жылдамдықпен өңдегенде амплитудасы 0,03 мм болатын кавитациялық дірілдер тіркелген, ал жылдамдықты $\varnothing = 120$ мм/мин төмендеткенде амплитуданың 0,01 мм дейін төмендегені зерттелген [5].

Бағыттаушы беттерінің өзара параллель болмауы немесе оларды орнату қателіктері құралдың қозғалу жылдамдығының есе-

2021-2024 жж. СББ станоктардың істен шығу себептері

Ел	Бұрандалы беттердің тозуы	Электроникалық ақаулар	Механикалық сыну және ақаулар	Бағдарламалық жасақтама мәселелері	Сыртқы факторлар
Ресей	75,20%	12,50%	8,30%	2,10%	1,90%
Украина	70,80%	14,10%	9,70%	3,20%	2,20%
Беларусь	68,50%	13,80%	10,40%	4,50%	2,80%
Қазақстан	72,10%	15,30%	7,60%	3,00%	2,00%
Өзбекстан	65,40%	16,70%	11,20%	4,10%	2,60%
Орта көрсеткіш	72,34%	14,48%	9,44%	3,38%	2,30%



1-сурет – СББ станоктарындағы діріл көздері

ленген жиіліктегі діріліне әкеледі. Мысалы, каретканың 0,05 мм қисаюы дірілді 3-5 есе арттырады [9].

Өздігінен қозатын дірілдер (автоматты дірілдер) кесу процесі мен жүйенің деформациясы арасындағы кері байланыстың нәтижесінде пайда болады. Оның басты механизмдері кесу күштерінің өзгеруі, мойынтірек түйіндеріндегі үйкелісі, термодинамикалық әсерлер болып табылады.

Тұтқырлығы жоғары материалдарды өңдеу кезіндегі кесу күштерінің 200-800 Н диапазонының өзгеруі (мысалы, тот баспайтын болаттар) құралдың 100-500 Гц жиіліктегі дірілін тудырады [6]. Бұл Армареихтің кесу теориясына сәйкес келеді, мұнда тербеліс амплитудасы кесу тереңдігіне тура пропорционал.

Мойынтірек түйіндеріндегі құрғақ үйкеліс немесе дұрыс майланбауы «жабысып сырғанауды» (stick-slip) тудырады және жиілігі 50-200 Гц тербелістерді тудырады. Мойынтіректерді гибриді керамикамен ауыстыру автоматты тербеліс амплитудасын 40%-ға төмендететіні тәжірибеде тіркелген [5].

Айналдырықтың немесе құралдың бірқалыпты қызбауы жылулық деформациясын тудырады, бұл [8] сәйкес 10°C-тан жоғары температура айырмашылығында дірілді 18%-ға арттыруы мүмкін.

Акустикалық резонанстар айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігінде пайда болады. Бұл құбылыс бұрандалы беттерді кесу үшін сыни, өйткені ұзын, жіңішке білікте үздіксіз спираль кесіледі. Мұндай жүйеде шексіз циклдік акустикалық толқын пайда болады, ол білік денесінен өтіп, интерференция заңдылығын жоғарылатады, ал конструкцияның қатаңдығы және басқару алгоритмі резонанстық сипаттарға әсер етеді.

Әдеттегі токарлық станок үшін меншікті жиіліктер 50-500 Гц аралығында болады. Мысалы, 1,5 м ұзындықта 120 Гц жиілікті резонанс болатыны анықталған [9].

Айналдырықтың айналу жиілігі бұрандалы жұптың жиілігімен сәйкес келгенде тербелістердің амплитудасы 3-7 есе жоғарылайды. Бұл спектрлі сараптамамен расталған, тіркелген дірілдің шыңы 9-11 құрайды [9].

Бірқатар зерттеулерде аталғандай [8-9], қалпына келтірілген бұрандалы механизмдер әдетте, беріктікті төмендеуімен және станок қондырғыларының құрамындағы діріл деңгейінің жоғарылауымен сипатталады. Бұл бұрандалы беттерді кесу процесінде пайда болатын дірілді бағалау әдістерін әзірлеуді, сондай-ақ, қалпына келтіру кезінде оларды азайтудың тиімді жолдарын іздеуді қажет етеді. Осы міндеттерді кешенді шешу бұрандалы беттерді өндіру және қалпына келтіру процестерінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді, бұл әсіресе бұрандаларды ауыстырумен бірге жүретін шектеулерге байланысты:

- СББ станок бұрандаларының жоғарғы құны: шет елдік бұрандалардың бағасы бүкіл станок жинағының құнының 40% дейін болуы мүмкін;

- Өндіру ұзақтығы: дәлдігі 4 қвалитетті бұранданы өндіру кезінде оны сонымен қатар, термиялық өңдеу мен ажарлауға 5-7 жұмыс күні қажет;

- Сыртқы жеткізілімдерге тәуелділік: жақын және алыстағы шет елдердегі компоненттердің үлесі 70%-ға жетеді, бұл логистикадағы өзгертулер кезіндегі жабдықтың тоқтап қалу қаупін арттырады.

Бұрандалы беттерді қалпына келтіру келесі әдістермен жүзеге асырылады (2-сурет) [10]:

- Тозған аймақтарды балқыту және механикалық өңдеу.

- $\pm 0,01$ мм дәлдікпен бұранда пішінін қалпына келтіру үшін тозған беттерді хромдау.

- Геометрияны түзету үшін лазермен балқыту.

Талқылау. Қалпына келтірілген бұрандалар жаңа өнімдермен салыстырғанда пайдалану ресурстары төмен, бұл келесі факторлармен байланысты:

- Қолданылатын материалдардың сәйкес келмеуі: бастапқы легірленген болаттардың орнына 40XH маркалы болатты пайдалану (мысалы, 18XГТ) тозуға төзімділіктің 30%-ға дейін төмендеуіне әкеледі;

- Технологиялық ауытқулар: қалпына келтіру кезінде пайда болатын қателіктер, атап айтқанда, бұрандалы беттің қадамының ұзындығы метріне 0,02 мм-ге дейін ауытқуы теңгерімсіздікті тудыруы және резонанстық дірілді тудыруы мүмкін.

- Бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезінде дірілдің пайда болу себептерін талдай отырып, дірілдің төмендеуі және сәйкесінше кесілген беттердің сапасының жоғарылауы станоктарды пайдалануға беру шығындарын едәуір төмендететінін атап өтуге болады.

Қорытынды

1. Қалпына келтірілген бұрандалы беттер көбінесе дірілдің жоғарылау көзіне айналады, әсіресе қадам дәлдігі сақталмағанда, жарамсыз материалдарды қолданғанда және балқыту кезінде технологиялық ауытқулар болғанда.

2. СББ станоктарындағы дірілдің негізгі көздері:

- Мәжбүрлі дірілдер (дисбаланс, эксцентриситет, кавитация).

- Өздігінен қозатын дірілдер (кесу және үйкеліс күштерінің өзгеруінен болатын дірілдер).

- Акустикалық резонанстар (айналдырықтың айналу жиілігінің жүйе жиілігімен сәйкестігі).



2-сурет – Бұрандалы беттерді қалпына келтіру әдістері

3. Діріл мыналарға әсер етеді:
- Өңдеу және позициялау дәлдігінің төмендеуі.
- Баптау уақыты мен құны артады.
- Қалпына келтірілген түйіннің ресурсы төмен.
4. Бұрандалы беттерді қалпына келтіру кезіндегі дірілді азайту үшін:
- Түпнұсқа сипаттамаларға сәйкес келетін материалдарды мұқият таңдау.

- Балқыту және жону кезінде бұранда геометриясын дәл сақтау.
- Дірілді бақылаудың диагностикалық әдістерін әзірлеу.
5. Ұсынылған деректер шет елдік машина жасау кәсіпорындарында бұрандалы жұптарды жөндеу және техникалық қызмет көрсету бойынша ұсыныстарды әзірлеу үшін негіз бола алады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Holodkova, A.G. Obshhie osnovy tehnologii metalloobrabotki i rabot na metallovezhushhih stankah / A.G. Holodkova. – Vologda: Infra-Inzheneriya, 2015. – 256 p.
2. Chukarin, A.N. Teorija i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tehnologicheskikh mashin dlja mehanicheskoy obrabotki / A.N. Chukarin. Feder. agentstvo po obrazovaniju, GOU VPO Don. gos. tehn. un-t. Rostov n/D: Izd. centr DGTU, 2020. 151 p. EDN QNAZWX.
3. D.Z. Evseev. Novoe v bezopasnosti i zhiznedejatel'nosti i jekologii: Sb. st. dokl. konf. 14-16 okt. Sankt-Peterburg, 2019. Pp. 222-223.
4. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / A.E. Nabokov, I.A. Jaickov, A.N. Chukarin. AKUSTIKA, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41. Pp. 189-194. DOI: 10.36336/akustika 202141189.
5. Battarra M., Mucchi E. Incipient cavitation detection in external gear pumps by means of vibro-acoustic measurements. Measurement. – 2018. – Volume 129. – Pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.013>
6. Zuti Z., Shuping C., Huawei W, Xiaohui L., Jia D., Yuquana Z. The approach on reducing the pressure pulsation and vibration of seawater piston pump through integrating a group of accumulators. Ocean Engineering. – 2019. – Volume 173. – Pp. 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.078>
7. Svishchev A.V., Aistov I.P. The Theoretical and Experimental Studies Comparison of the Pressure Pulsation in the Discharge Chamber of the Gear Pump // Procedia Engineering. – 2024. – Volume 113. – Pp. 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.316>
8. Rituraj R., Vacca A. Investigation of flow through curved constrictions for leakage flow modelling in hydraulic gear pumps. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Volume 153. – Pp. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107503>
9. Krishnasamy K., Subbulekshmi D., Deepa T., Gnanasekaran B.M., Maridurati T., Sriram M., Kumar, S.S., Markos, M. Fatigue Failure Analysis of a Gear in Automobile Engine Coolant Pump. Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – 3982415. – Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/3982415>
10. Zhao X., Vacca A. Analysis of continuous-contact helical gear pumps through numerical modeling and experimental validation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Volume 109. – Pp. 352-378. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.043>

Анализ причин вибраций при восстановлении винтовых поверхностей на станках с ЧПУ

¹**БУЗАУОВА Тоты Мейрбековна**, к.т.н., ассоциированный профессор,
t.buzauova@ktu.edu.kz,

¹***ЕНБЕК Дамир Жаксыбекулы**, докторант, damiko_e@mail.ru,

²**ГАВРИЛИН Алексей Николаевич**, д.т.н., профессор, gawral@tpu.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина,
30, Томск, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Вибрации в станках с ЧПУ являются критическим фактором, влияющим на точность обработки и срок службы оборудования. При восстановлении винтовых поверхностей приводных валов, которые отвечают за прецизионное перемещение исполнительных органов, анализ вибраций приобретает особую значимость. Неконтролируемые колебания приводят к ускоренному износу компонентов, снижению качества деталей и увеличению времени простоя оборудования. В статье рассматриваются причины и характер вибраций, возникающих при восстановлении винтовых поверхностей на станках с числовым программным управлением. Показано, что после наплавки и последующей механической обработки восстановленные винтовые пары подвержены усиленным вибрациям, что снижает точность позиционирования, долговечность и качество обработки. Проведен анализ источников вынужденных, самовозбуждающихся и акустических колебаний, их связи с технологическими и конструктивными параметрами. Особое внимание уделено влиянию несоответствия материалов, отклонений шага винта и конструктивных дефектов. Обоснована необходимость комплексного подхода к контролю вибраций и совершенствованию методов восстановления винтов, включая подбор материалов и контроль геометрии витков. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности восстановления и увеличения ресурса винтовых пар в системах с ЧПУ.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, винтовые пары, вибрации, шарико-винтовые приводы.

Analysis of Vibration Causes During the Restoration of Screw Surfaces on CNC Machines

¹**BUZAUOVA Toty**, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, t.buzauova@ktu.edu.kz,

¹***YENGBEK Damir**, Doctoral Student, damiko_e@mail.ru,

²**GAVRILIN Aleksey**, Dr. of Tech. Sc., Professor, gawral@tpu.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56,
Karaganda, Kazakhstan,

²National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Russia,

*corresponding author.

Abstract. Vibrations in CNC machines are a critical factor affecting machining accuracy and the service life of equipment. During the restoration of screw surfaces of drive shafts, which are responsible for the precision movement of actuators, vibration analysis becomes especially important. Uncontrolled oscillations lead to accelerated wear of components, reduced part quality, and increased equipment downtime. This article examines the causes and nature of vibrations that occur during the restoration of screw surfaces on computer numerical control (CNC) machines. It is shown that after welding and subsequent machining, the restored screw pairs are subject to intensified vibrations, which reduces positioning accuracy, durability, and machining quality. An analysis of the sources of forced, self-excited, and acoustic vibrations is carried out, along with their relationship to technological and design parameters. Special attention is given to the influence of material mismatches, screw pitch deviations, and design defects. The need for a comprehensive approach to vibration control and the improvement of screw restoration methods is substantiated, including material selection and control of thread geometry. The results obtained can be used to improve the accuracy of restoration and extend the service life of screw pairs in CNC systems.

Keywords: CNC machines, screw pairs, vibrations, ball screw drives.

REFERENCES

1. Holodkova, A.G. Obshhie osnovy tehnologii metalloobrabotki i rabot na metallovezhushhih stankah / A.G. Holodkova. – Vologda: Infra-Inzheneriya, 2015. – 256 p.
2. Chukarin, A.N. Teoriya i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tehnologicheskikh mashin dlja mehanicheskoy obrabotki / A.N. Chukarin. Feder. agentstvo po obrazovaniju, GOU VPO Don. gos. tehn. un-t. Rostov n/D: Izd. centr DGTU, 2020. 151 p. EDN QNAZWX.
3. D.Z. Evseev. Novoe v bezopasnosti i zhiznedejatel'nosti i jekologii: Sb. st. dokl. konf. 14-16 okt. Sankt-Peterburg, 2019. Pp. 222-223.
4. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / A.E. Nabokov, I.A. Jaickov, A.N. Chukarin. AKUSTIKA, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41. Pp. 189-194. DOI: 10.36336/akustika 202141189.
5. Battarra M., Mucchi E. Incipient cavitation detection in external gear pumps by means of vibro-acoustic measurements. Measurement. – 2018. – Volume 129. – Pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.013>
6. Zuti Z., Shuping C., Huawei W, Xiaohui L., Jia D., Yuquana Z. The approach on reducing the pressure pulsation and vibration of seawater piston pump through integrating a group of accumulators. Ocean Engineering. – 2019. – Volume 173. – Pp. 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.078>
7. Svishchev A.V., Aistov I.P. The Theoretical and Experimental Studies Comparison of the Pressure Pulsation in the Discharge Chamber of the Gear Pump // Procedia Engineering. – 2024. – Volume 113. – Pp. 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.316>
8. Rituraj R., Vacca A. Investigation of flow through curved constrictions for leakage flow modelling in hydraulic gear pumps. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Volume 153. – Pp. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107503>
9. Krishnasamy K., Subbulekshmi D., Deepa T., Gnanasekaran B.M., Maridurati T., Sriram M., Kumar, S.S., Markos, M. Fatigue Failure Analysis of a Gear in Automobile Engine Coolant Pump. Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – 3982415. – Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/3982415>
10. Zhao X., Vacca A. Analysis of continuous-contact helical gear pumps through numerical modeling and experimental validation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Volume 109. – Pp. 352-378. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.043>