

*V.I. GUREY***МОДЕЛЮВАННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Фрикційна обробка відноситься до методів поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, у процесі якої формується поверхневий зміцнений шар з нанокристалічною структурою. Висококонцентроване джерело енергії утворюється у зоні контакту інструмент-деталь за рахунок високошвидкісного тертя (60-90 м/с) інструменту по оброблювальній поверхні. На робочій поверхні інструменту сформовані поперечні пази, ширина яких забезпечує повний вихід інструменту з контакту з оброблювальною поверхнею. Процес фрикційної обробки перервний. Розроблено розрахункову схему пружної системи верстата, побудовано її математичну модель для дослідження динамічних процесів, які проходять під час фрикційної обробки плоских поверхонь. Отримано амплітудно-частотну характеристику процесу обробки. Визначено параметри системи, при яких можливий резонанс. Розроблено рекомендації щодо вибору кількості пазів на робочій поверхні інструменту, які впливають на параметри і характеристики зміцненого шару.

Ключові слова: фрикційна обробка, нанокристалічний шар, коливальна схема, резонанс, амплітудно-частотна характеристика.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ФРИКЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Фрикционная обработка относится к методам поверхностного упрочнения с использованием высококонцентрированных источников энергии, в процессе которой формируется поверхностный упрочнённый слой с нанокристаллической структурой. Такой источник энергии образуется в зоне контакта инструмент-деталь за счет высокоскоростного трения (60-90 м/с) инструмента по обрабатываемой поверхности. На рабочей поверхности инструмента сформированы поперечные пазы, ширина которых обеспечивает полный выход инструмента из контакта с обрабатываемой поверхностью. Процесс фрикционной обработки прерывчатый. Разработана расчетная схема упругой системы станка, построено ее математическую модель для исследования динамических процессов, которые проходят во время фрикционной обработки плоских поверхностей. Получены амплитудно-частотную характеристику процесса обработки. Определены параметры системы, при которых возможен резонанс. Разработаны рекомендации по выбору количества пазов на рабочей поверхности инструмента.

Ключевые слова: фрикционная обработка, нанокристаллический слой, колебательная схема, резонанс, амплитудно-частотная характеристика.

*V.I. GUREY***SIMULATION OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF FRICTION STRENGTHENING PROCESS OF FLAT MACHINE PARTS' SURFACES**

Friction treatment refers to surface strengthening (hardening) methods using highly concentrated energy sources, in the process of which a surface hardened layer with a nanocrystalline structure is formed. A highly concentrated energy source is formed in the contact area of the tool-part due to the high-speed friction (60-90 m/s) of the tool on the treatment surface. Friction treatment according to the kinematics of the process is similar to grinding. Transverse grooves are formed on the working surface of the tool to intensify the process of forming a reinforced layer with a nanocrystalline structure. The width of the groove provided a complete escaping of the tool from contact with the treated surface. Additional shock loads occur in the tool-contact area. The friction treatment process is discontinuous. The contact zone on the treated surface receives the pulsed action of thermal energy, shear deformation and additional shock load. The frequency of shock loads depends on the number of grooves on the working part of the tool.

The calculation scheme of the elastic system of the machine is developed. A mathematical model to study the dynamic processes that take place during the friction treatment of flat surfaces is built. The amplitude-frequency characteristic of the processing is obtained. The developed model of the machining process based on the analysis of the dynamic characteristics of the process gives the possibility to select the required number of grooves on the working part of the tool, the rotation speed of the tool. The parameters of the elastic system of the machine and the processing parameters at which resonance is possible are determined.

Keywords: friction treatment, nanocrystalline layer, oscillatory scheme, resonance, amplitude-frequency characteristic.

Вступ. Експлуатаційні властивості деталей машин залежать від параметрів якості контактуючих поверхонь та поверхневого шару, які визначаються геометричними (стереометричними) і фізико-механічними характеристиками та взаємним розташуванням мікронерівностей на контактуючих поверхнях [1]. Усі ці параметри залежать від технології обробки поверхонь деталей. Зміцнення поверхневого шару металу

деталей машин, у більшості випадків, підвищує експлуатаційні властивості виробів та підвищує їх ресурс роботи. Різні методи зміцнення впливають як на мікрогеометрію поверхні, так і на фізико-механічні і хімічні властивості поверхневих шарів металу, їх структуру, фазовий і хімічний склади, твердість і залишкові напруження тощо, а також на експлуатаційні характеристики виробів [2, 3].

Зміна параметрів і характеристик поверхневого шару відбувається за рахунок впливу на нього різного роду механічного, теплового та ударного навантаження. До таких методів відносяться технології поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії [4, 5]. Дія таких джерел енергії полягає у високошвидкісному нагріванні відносно невеликих об'ємів металу поверхневого шару до температур вище точки фазових перетворень, а після переміщення джерела енергії проходить високошвидкісне охолодження металу поверхневого шару. Сформований у таких екстремальних умовах нагрівання і охолодження, а у деяких випадках швидкісного зсувного деформування, поверхневий шар з нанокристалічною структурою має специфічні фізико-механічні, хімічні та експлуатаційні характеристики, які суттєво відрізняються від характеристик основного металу [6]. До таких методів поверхневого зміцнення відноситься і фрикційна обробка. У процесі фрикційного оброблення висококонцентроване джерело енергії утворюється у зоні контакту інструмент-деталь під час високошвидкісного тертя інструменту по оброблюваній поверхні. Під час обробки у зоні контакту інструмент-деталь також проходить інтенсивне зсувне деформування металу поверхневого шару. Після оброблення у поверхневому шарі деталей формується зміцнений (білий) шар з нанокристалічною структурою, який має значно вищу мікротвердість, змінений фазовий, структурний і хімічний склади у порівнянні з металом основної структури [6, 7]. У поверхневому шарі біля поверхні формуються залишкові напруження стиску, які суттєво впливають на експлуатаційні характеристики і покращують їх. Збільшується зносостійкість при різних видах тертя, опір втомному і корозійно-втомному руйнуванню тощо [7].

Постановка проблеми. При дослідженні фрикційного зміцнення найбільша увага приділялось вивченню питань формування зміцненого шару, його характеристик, впливу зміцненого шару на довговічність. У цей же час питанню динамічних процесів під час фрикційного зміцнення не приділялось уваги взагалі. Тому метою даної роботи було дослідити вплив параметрів фрикційної обробки на динамічні характеристики процесу зміцнення поверхневих шарів деталей машин.

Основний текст. Фрикційне оброблення за кінематикою процесу та виконанням подібне до процесу шліфування. Для його реалізації використовуються плоскошліфувальні верстати (для зміцнення плоских поверхонь) та круглошліфувальні верстати або спеціально розроблене обладнання (для зміцнення поверхонь тіл обертання). Замість абразивного круга встановлюється металевий інструмент-диск. Діаметральні розміри металевого інструмента відповідають розмірам шліфувального круга, який використовується на даному верстаті. Для утворення у зоні контакту інструмент-деталь відповідного концентрованого теплового потоку необхідна лінійна швидкість на периферії 60-90 м/с. На верстатах швидкість шліфувального круга становить 36 м/с, тому для збільшення частоти обе-

ртання інструмента необхідно провести модернізацію вузла головного приводу шліфувального круга, інші функціональні рухи верстата залишаються без зміни.

Фрикційне оброблення плоских поверхонь проводили на модернізованому плоскошліфувальному верстаті фірми KNUHN моделі HFS 3063 VS. Замінили електродвигун змінного струму на двигун постійного струму з більшою частотою обертання та більшою потужністю. Провели перевірочний розрахунок підшипників шпіндельного вузла при роботі з більшими частотами обертання та більшими навантаженнями. Зовнішній діаметр інструмента-диска становив 360 мм, ширина його робочої частини – 8-10 мм. Металевий диск встановили на планшайбу, яка входить у набір комплектації даного верстата. Перед встановленням планшайби з металевим диском на верстат проводили її статичне балансування. Для балансування інструменту використовується система як для абразивного інструменту [8].

Під час фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент-деталь проходить інтенсивне тертя інструмента по оброблювальній поверхні деталі. У зоні контакту виникає інтенсивне джерело теплової енергії, а також зсувне деформування поверхневого шару. Для збільшення товщини зміцненого шару, а також подібнення його мікроструктури у зоні контакту створюємо додаткове джерело ударного навантаження за рахунок нарізання поперечних пазів на робочій поверхні інструменту-диску. Робоча частина інструменту є перервною, тобто чергуються гладка частина і паз. Ширина пазу вибирається з умови гарантованого повного виходу з контакту робочої поверхні інструменту з оброблюваною поверхнею. Ширина пазу становить 2-4 мм. Під час фрикційного оброблення інструмент притискається з певною силою (400-1000 Н) до оброблюваної поверхні. Під її дією у зоні контакту виникає радіальна складова сили взаємодії. За рахунок обертання інструмента у зоні контакту виникає тангенціальна складова сили взаємодії, яка буде визначати величину інтенсивності теплового потоку. Під час проходження пазу над зоною контакту інструмент-деталь зона контакту розвантажується і у цей момент часу нормальна і тангенціальні складові сили взаємодії рівні нулеві. Дія джерела теплової енергії призупинена. Поверхня зони контакту під дією пружної деформації піднімається. Під час входження у контакт наступної гладкої частини інструменту проходить ударне навантаження зони контакту, а потім високошвидкісне тертя гладкої частини інструменту по оброблюваній поверхні. У зоні контакту відновлюється дія джерела інтенсивної теплової енергії. Зона контакту на оброблюваній поверхні сприймає імпульсну дію теплової енергії, зсувного деформування та додаткового ударного навантаження. Частота ударних навантажень залежить від кількості пазів на робочій частині інструменту. Усі ці процеси сприяють формуванню зміцненого білого шару з нанокристалічною структурою більшої товщини з підвищеною твердістю і відповідно більш фрагментованим і подрібненим зерном, ніж після оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею інструмента.

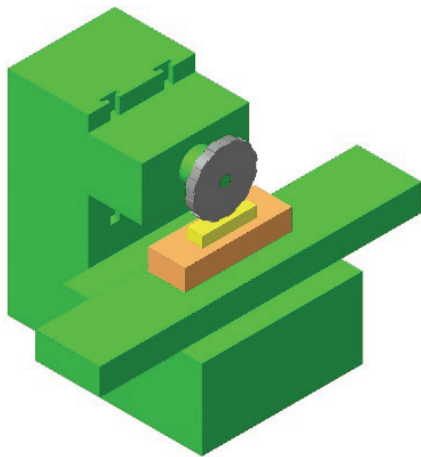


Рисунок 1 – Умовна 3D модель шліфувального верстата

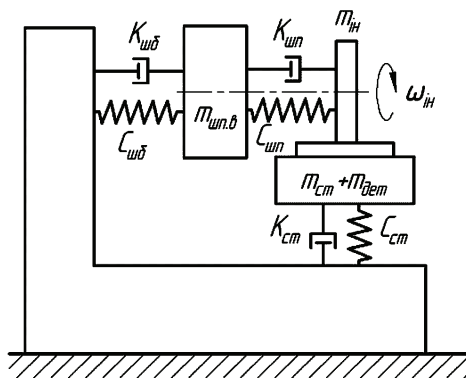


Рисунок 2 – Коливальна схема верстата

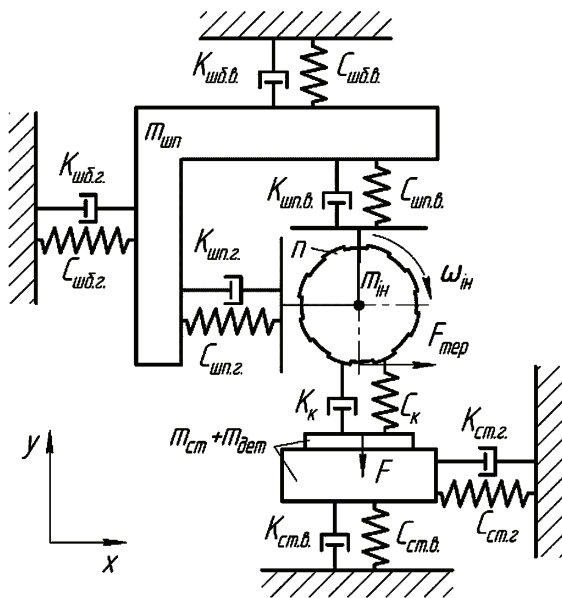


Рисунок 3 – Розрахункова схема верстата

Для дослідження динамічних процесів, які проходять під час фрикційного оброблення плоских поверхонь розробляємо розрахункову схему пружної системи верстата, яка представляє собою багатомасову модель. Для цього верстат розбиваємо на ряд вузлів, кожен з яких представляє собою окрему масу (рис. 1). Крім цього визначають деталь або вузол, який при-

ймається як деталь з умовно безмежною масою до якої «прив'язуються» усі решта мас. Розрахункова схема пружної системи верстата є тримасовою моделлю. Як деталь з умовно безмежною масою прийнята станина верстата до якої «прив'язані» усі решта мас. Взаємозв'язок між окремими масами описуються пружними і демпфуючими зв'язками (рис. 2). Удар між деталлю та інструментом (вертикальний) змодельований за допомогою контактної жорсткості (c_k) та демпфування енергії ($k_{ун.с}$) локального пружно-пластичного деформування поверхні деталі. Наведену вище коливальну схему замінюємо на еквівалентну розрахункову схему верстата, яка подана на рис. 3.

Запишемо системи диференціальних рівнянь, які описують пружну систему плоско-шліфувального верстата при фрикційному обробленні плоских поверхонь деталей машин інструментом з поперечними пазами на периферії:

– у вертикальному напрямі:

$$\begin{aligned}
 m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + c_{ун.с} (y_1 - y_2) + k_{ун.с} \left(\frac{dy_1}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + \\
 + c_{уб.с} (y_1) + k_{уб.с} \left(\frac{dy_1}{dt} \right) = 0; \\
 m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + c_k (y_2 - y_3) + k_k \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_3}{dt} \right) + \\
 + c_{ун.с} (y_2 - y_1) + k_{ун.с} \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) = F; \\
 m_3 \frac{d^2 y_3}{dt^2} + c_k (y_3 - y_2) + k_k \left(\frac{dy_3}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + \\
 + c_{см.с} (y_3) + k_{см.с} \left(\frac{dy_3}{dt} \right) = -F.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

– у горизонтальному напрямі:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 x_1}{dt^2} m_1 + c_{ун.з} (x_1 - x_2) + \\
 + k_{ун.з} \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_{уб.з} (x_1) + k_{уб.з} \left(\frac{dx_1}{dt} \right) = 0; \\
 \frac{d^2 x_2}{dt^2} m_2 + c_{ун.з} (x_2 - x_1) + k_{ун.з} \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) = F_{мер}; \\
 \frac{d^2 x_3}{dt^2} m_3 + c_{см.з} (x_3) + k_{см.з} \left(\frac{dx_3}{dt} \right) = -F_{мер}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де y_1, x_1 – вертикальні та горизонтальні переміщення шпindel'ної бабки (м); y_2, x_2 – вертикальні та горизонтальні переміщення інструмента (м); y_3, x_3 – вертикальні та горизонтальні переміщення стола верстата (м). m_1 – маса шпindel'ної бабки (вузла) (кг); m_2 – маса інструмента (диска) (кг); $m_3 = m_{см} + m_{дет}$ – маса стола та оброблювальної деталі (кг); F – сила притиску інструмента до оброблювальної деталі; $c_{ун.с}$ – вертикальна жорсткість шпindel'я (Н/м); $c_{уб.с}$ – вертикальна жорсткість шпindel'ної бабки (Н/м); $c_{см.с}$ – вертикальна жорсткість стола верстата (Н/м); c_k – контактна жорсткість між оброблювальною деталлю та інструментом (Н/м); $k_{ун.с}$ – коефіцієнт вертикального демп-

фування шпинделя (Нс/м); $k_{уб.с.}$ – коефіцієнт вертикального демпфування шпиндельної бабки (Нс/м); $k_{ст.с.}$ – коефіцієнт вертикального демпфування стола (Нс/м); k_k – коефіцієнт демпфування між інструментом і деталлю (внутрішнє затухання) (Нс/м). Тертя між деталлю та інструментом

$$F_{мер} = F \cdot f(H).$$

Як було представлено вище даний процес оброблення є перервним, тобто для підвищення величини товщини зміцненого шару необхідно не лише збільшення температури нагрівання, яка повинна бути вищою за точки фазових перетворень у зоні контакту між деталлю та інструментом, а і збільшити зсувні деформування, які формуються за допомогою чергування гладкої частини та пазу. Ширина паза вибирається таким чином, щоб забезпечити повний вихід з контакту деталі з інструментом. На основі проведеного математичного моделювання термопружності у зоні контакту інструменту з оброблюваною поверхнею, отримано результати зміни величини напружень. Під дією гладкої частини інструменту та пазу напруження у поверхневому шарі металу зони контакту змінюються в межах від 0,1 ГПа до 2 ГПа [9].

Збурення пружної системи верстата відбувається за рахунок входження пазів (n), які знаходяться на робочій поверхні диска і чергуються з гладкою частиною диска у контакт з оброблюваною поверхнею. Спочатку розглянемо випадок, коли відношенням гладкої частини диска до паза один до одного. Приймаємо, що збурення коливальної системи буде відбуватися за законом

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t),$$

де ω – колова швидкість інструмента, на якому знаходяться пази (n). Тому збурення коливальної системи буде мати наступний вигляд

$$\omega = \omega_{in} \cdot n.$$

Для дослідження впливу кількості пазів на робочій частині інструменту на динамічні характеристики процесу фрикційного оброблення проведемо аналіз системи з допомогою частотних характеристик. Тому, силу збурення подаємо як $\bar{F}_0 e^{i\omega t}$, а результат шукати мемо у вигляді $\bar{X}_1 e^{i\omega t}$, $\bar{X}_2 e^{i\omega t}$, $\bar{X}_3 e^{i\omega t}$, $\bar{Y}_1 e^{i\omega t}$, $\bar{Y}_2 e^{i\omega t}$ та $\bar{Y}_3 e^{i\omega t}$, де $i = \sqrt{-1}$ – комплексна одиниця; \bar{F}_0 – амплітуда комплексної змінної сили збурення; \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , \bar{X}_3 , \bar{Y}_1 , \bar{Y}_2 та \bar{Y}_3 – комплексні амплітуди.

Підставивши комплексні величини в систему (1) та (2) та поділивши ліві та праві частини отриманих рівнянь на $e^{i\omega t}$ отримаємо систему:

– у горизонтальному напрямі:

$$\begin{aligned} -m_1 \bar{X}_1 \omega^2 + c_{ун.з.} (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) + i\omega k_{ун.з.} (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) + \\ + c_{уб.с.} (\bar{X}_1) + i\omega k_{уб.с.} (\bar{X}_1) = 0; \\ -m_2 \bar{X}_2 \omega^2 + c_{ун.з.} (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ i\omega k_{ун.з.} (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) = F_{мер};$$

$$-m_3 \bar{X}_3 \omega^2 + c_{см.з.} (\bar{X}_3) + i\omega k_{см.з.} (\bar{X}_3) = -F_{мер}.$$

– у вертикальному напрямі:

$$\begin{aligned} -m_1 \bar{Y}_1 \omega^2 + c_{ун.с.} (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) + i\omega k_{ун.с.} (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) + \\ + c_{уб.с.} (\bar{Y}_1) + i\omega k_{уб.с.} (\bar{Y}_1) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -m_2 \bar{Y}_2 \omega^2 + c_k (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_3) + i\omega k_k (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_3) + \\ + c_{ун.с.} (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) + i\omega k_{ун.с.} (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) = F; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -m_3 \bar{Y}_3 \omega^2 + c_k (\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2) + i\omega k_k (\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2) + \\ + c_{см.с.} (\bar{Y}_3) + i\omega k_{см.с.} (\bar{Y}_3) = -F. \end{aligned}$$

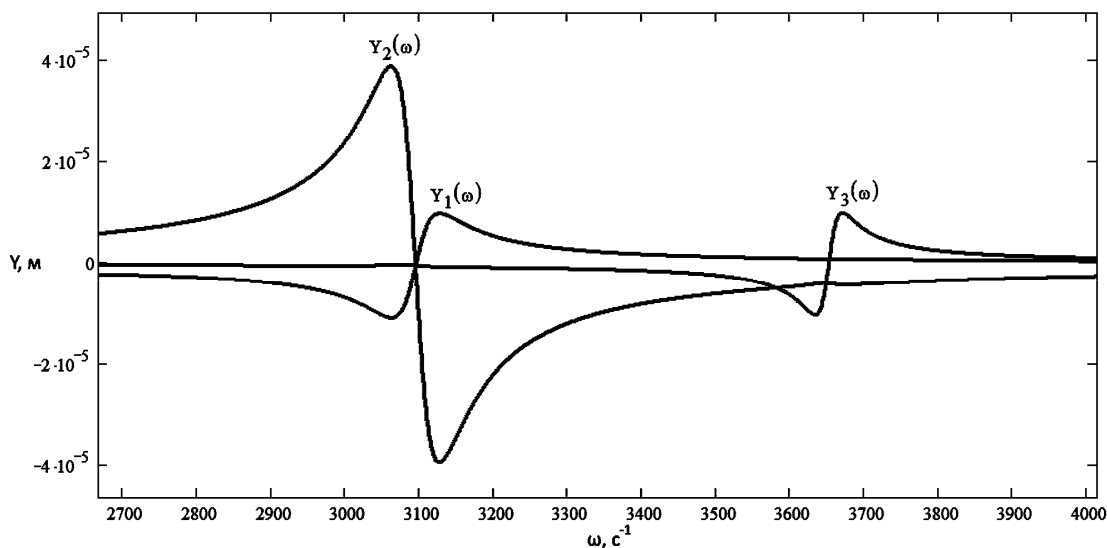


Рисунок 4 – Графік амплітудно-частотної характеристики технологічної системи

За допомогою математичного пакету *MathCAD* проводимо символний розв'язок систем рівнянь (3) та (4) та знаходимо модулі комплексних амплітуд

X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2 та Y_3 . Через громіздкий вигляд рівнянь модулів комплексних амплітуд у статті не подаються. На основі аналізу отриманої АЧХ пружної сис-

теми (4), представленої на рис. 4, отримуємо значення частот збурення при яких виникає резонанс у системі. Так, резонанс шпindelної бабки відбувається при $\omega_1 = 3050 \text{ c}^{-1}$, інструмента – $\omega_2 = 3150 \text{ c}^{-1}$, а стола при $\omega_3 = 3650 \text{ c}^{-1}$. Розрахунки частот ударних навантажень визначено для інструмента на робочій поверхні якого є один паз. Для визначення небезпечних частот обертання інструменту і кількості нарізаних пазів на робочій частині інструменту при яких може виникнути резонанс, побудували графічну залежність виникнення резонансу від кількості пазів (рис. 5).

З отриманої залежності випливає, що при збільшенні кількості пазів на робочій частині інструменту

зменшується швидкість на його периферії при якій можливий резонанс. Мінімальна швидкість під час якої проходить процес фрикційного зміцнення складає 60 м/с. При такій швидкості резонанс можливий, якщо на робочій поверхні інструменту буде 8-11 пазів. Тому для нормальної роботи інструмента необхідно, щоб на робочій частині інструменту було не менше 12 пазів. Інструмент буде працювати при нормальних умовах коливань на частотах які є зміщені вправо від резонансу системи (див. рис. 4).

Для дослідження стійкості пружної системи верстата була побудована АФЧХ розімкнутої системи. Отримана АФЧХ не охоплює точку з координатами $(-1; i0)$, тобто замкнена система стійка.

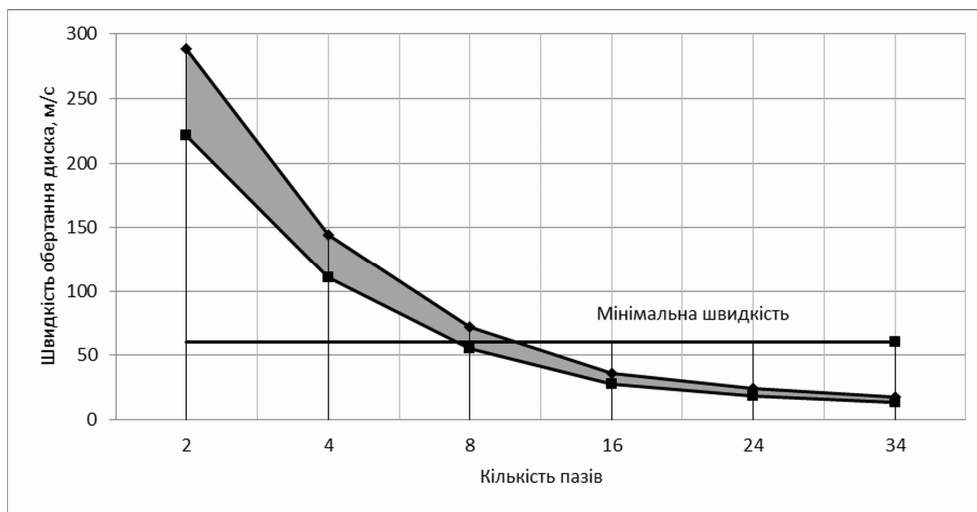


Рисунок 5 – Залежність частот виникнення резонансу від кількості пазів

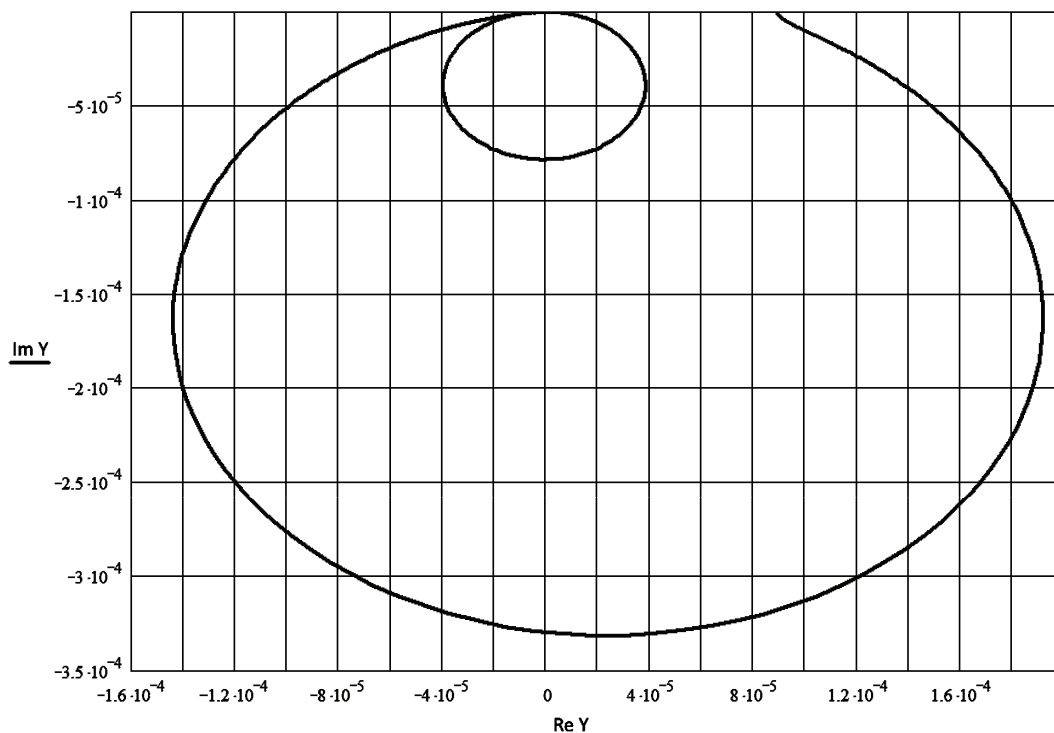


Рисунок 6 – Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкнутої системи

Висновки. Розроблена динамічна модель механічних процесів, які проходять при фрикційній обробці деталей машин інструментом з перервною робочою частиною, яка дозволяє дослідити АЧХ системи і згідно якої надати рекомендації з вибору кількості пазів на робочій частині інструмента.

Список літератури

1. Юценко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д. та ін. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. 558 с.
2. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов / под ред. В.Д. Евдокимова. Одесса-Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.
3. Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. Поверхностное упрочнение металлов. Київ: Наукова думка, 1995. 256 с.
4. Soundarapandian S., Dahotre Narendra B. Laser Surface Hardening. ASM Handbook. V. 4A. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes / eds. Jon Dossett and George E. Totten. 2013. P. 476-502.
5. Xiangming Huang, Zhixiong Zhou, Yinghui Ren at all Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66, iss. 9-12. P. 1555-1561.
6. Faezeh Mojtahedi, Hamidreza Shahverdi, Mohammad Javad Torkamany Surface treatment of nano-structured steel with pulsed laser. Materials Physics and Mechanics. 2013. № 17. P. 17-21.
7. Gurey V., Hurey I. The Effect of the Hardened Nanocrystalline Surface Layer on Durability of Guideways. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes. Selected Papers from the Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2019), September 10-13, 2019, Odesa, Ukraine. P. 63-72. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_7
8. Hurey I., Gurey V., Dmyterko P. at all The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces. Advances in manufacturing science and technology. 2014. № 3. P. 56-64.
9. Шинкаренко Г.А., Луців І.В., Гурей В.І. Моделивання змін температури в зоні контакту інструмент-деталь під

час фрикційного зміцнення деталей машин. Машинознавство. 2011. № 11-12. С. 47-52.

References (transliterated)

1. Yushchenko K.A., Borysov Yu.S., Kuznetsov V.D. at all Inzheneriya pohlyadu. Kyiv: Naukova dumka, 2007. 558 p.
2. Evdokymov V.D., Klymenko L.P., Evdokymova A.N. Tekhnolohiya uprochnen mashynobudivnykh materialiv / pid red. V.D. Evdokymova. Odesa-Mykolayiv: Yzd-vo NHHU ym. Petra Mohyly, 2005. 352 p.
3. Babey Yu.Y., Butakov B.Y., Sysoev V.H. Poverkhnostnoe uprochnenye metallov. Kyiv: Naukova dumka, 1995. 256 p.
4. Soundarapandian S., Dahotre Narendra B. Laser Surface Hardening. ASM Handbook. V. 4A. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes / eds. Jon Dossett and George E. Totten. 2013. P. 476-502.
5. Xiangming Huang, Zhixiong Zhou, Yinghui Ren at all Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66, iss. 9-12. P. 1555-1561.
6. Faezeh Mojtahedi, Hamidreza Shahverdi, Mohammad Javad Torkamany Surface treatment of nano-structured steel with pulsed laser. Materials Physics and Mechanics. 2013. № 17. P. 17-21.
7. Gurey V., Hurey I. The Effect of the Hardened Nanocrystalline Surface Layer on Durability of Guideways. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes. Selected Papers from the Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2019), September 10-13, 2019, Odesa, Ukraine. P. 63-72. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_7
8. Hurey I., Gurey V., Dmyterko P. at all The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces. Advances in manufacturing science and technology. 2014. № 3. P. 56-64.
9. Shynkarenko H.A., Lutsiv I.V., Hurey V.I. Modelyuvannya zmin temperatury v zoni kontaktu instrument-detal pid chas fryktsiynoho zmishchennya detaley mashyn. Mashynoznavstvo. 2011. № 11-12. P. 47-52.

Надійшла (received)» 23.12.2020.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гурей Володимир Ігорович (Гурей Владимир Игоревич, Gurey Volodymyr Igorovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка». Тел. (067) 351-52-02. E-mail: vgurey@gmail.com