

УДК 621.9.048.6

Я.М. КУСИЙ, В.Г. ТОПІЛЬНИЦЬКИЙ *

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування,
*кафедра електронного машинобудування

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДОВГОМІРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

© Кусий Я.М., Топільницький В.Г., 2009

Досліджено вплив технологічних параметрів методу вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) стосовно довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів. Викладено методіку досліджень, наведено принципову схему устави для дослідження впливу основних технологічних параметрів методу ВВЗ на геометричні параметри якості поверхні. Проаналізовано емпіричні та графічні залежності впливу технологічних параметрів методу ВВЗ на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей з конструкційних матеріалів, встановлено раціональні режими оброблення.

The influence of technological parameters of a vibratory-centrifugal strengthening treatment (VCST) for hardening of long-sized cylindrical details, which are manufactured of constructional materials, is explored in this article. The procedure of research examinations, principle diagrams of the hardening instrument with an electromagnetic drive and mechanisms for embodying a vibratory-centrifugal strengthening treatment are suggested. The mathematical equations and pictorial diagrams of technological parameter's influence of a method VCST for geometric properties quality of long-sized cylindrical details, which are manufactured of constructional materials, are analysed.

Постановка проблеми у загальному вигляді. На сучасному етапі розвитку провідних галузей промисловості пріоритетного значення набувають проблеми забезпечення надійності і підвищення довговічності, а також конкурентоспроможності виробів. Вирішення цих взаємозв'язаних технічних і економічно важливих для народного господарства країни завдань пов'язане з покращанням експлуатаційних характеристик виробів, зокрема довгомірних циліндричних деталей, що поширені в конструкціях деталей машин [1, 2]. Поставленої мети досягають завдяки застосуванню нових ефективних, енергоощадних методів оброблення, які реалізуються під час використання прогресивних конструкцій інструментів, технологічного оснащення та досягнутим параметрам якості. Отримання необхідних параметрів якості поверхні можливе, зокрема, у разі широкого застосування методів оздоблювально-викінчувального оброблення.

У Національному університеті “Львівська політехніка” розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ), що базується на поверхневому пластичному деформуванні (ППД) оброблюваних поверхонь, спроектовано, виготовлено та апробовано відповідне технологічне обладнання з дебалансним та електромагнітним приводами, яке здатне ефективно вирішити проблему технологічного забезпечення параметрів якості довгомірних деталей, зокрема під час оброблення їх зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь [1,3].

На підставі досліджень, виконаних у Національному університеті “Львівська політехніка”, розроблено рекомендації стосовно вибору раціональних конструктивно-технологічних характеристик для забезпечення необхідних з експлуатаційного погляду фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару довгомірних циліндричних деталей (мікротвердості, товщини зміцненого шару,

ступеня нагартування). Однак для промислового впровадження методу ВВЗ необхідно здійснити комплексні експериментальні дослідження з метою повного відтворення впливу технологічних факторів методу вібраційно-відцентрового зміцнення на мікрогеометричні параметри якості поверхні виробів із конструкційних сталей та систематизації отриманих результатів у комплексній емпіричній моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід експлуатації машин, приладів, апаратів переконливо свідчить, що надійність та довговічність залежать від характеру контактування спряжених деталей одна з одною або з рідким, газовим та іншим середовищем, що визначає стан поверхневого шару контактних деталей [4]. Крім того численними дослідженнями, насамперед науковців країн СНД (Росії, України, Білорусії), зокрема Д.Д. Папшева, І.В. Кудрявцева, Ю.Г. Шнейдера, Л.О. Хворостухіна, Ю.І. Бабея, Б.І. Костецького, П.І. Ящеріцина, П.А. Чепи та багатьох інших, встановлено, що якість поверхні деталей машин істотно визначає зносостійкість, міцність, корозійну стійкість тощо експлуатаційні властивості деталей машин. Ю.Г. Шнейдер запропонував класифікацію геометричних та фізико-механічних параметрів якості поверхні у взаємозв'язку із експлуатаційними властивостями деталей машин і приладів, які вони визначають [4].

Проблемам технологічного забезпечення геометричних параметрів якості поверхні присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених і дослідників в галузі ППД, як-от: Е.В. Рижов, М.Б. Дьомкін, Ю.Р. Вітенберг, І.В. Крагельський, Б.І. Костецький, Ю.Г. Шнейдер, П.І. Ящеріцин і багато інших.

Як свідчать результати теоретичних і експериментальних досліджень, значний вплив на формування експлуатаційних властивостей виробів (міцності з'єднання, зносостійкості, втомної міцності, протикорозійної міцності, відбивання світлових і електромагнітних хвиль, декоративних властивостей) має шорсткість поверхні – сукупність мікронерівностей з порівняно малими кроками. Основними характеристиками шорсткості поверхні згідно з ГОСТ 2789-73 і ISQ 4287 є середнє арифметичне відхилення профілю R_a , середнє квадратичне відхилення профілю R_q , висота нерівностей профілю по десяти точках R_z , висота згладжування R_p , найбільша висота нерівностей профілю R_{max} , середній крок нерівностей профілю S_m , середній крок нерівностей по вершинах S , радіус кривизни виступу профілю r . Розподіл матеріалу в шорсткому шарі твердого тіла характеризує опорна крива профілю поверхні, яку будують у безрозмірних величинах [5].

У Національному університеті “Львівська політехніка” виконано експериментальні дослідження щодо впливу технологічних параметрів вібраційного зміцнення на якість поверхневих шарів довгомірних циліндричних виробів, основні результати яких наведено у науково-технічній літературі. Зокрема у роботах [6, 7] на підставі опрацювання результатів експериментів, досліджено вплив технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнення на фізико-механічні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів, зокрема із сталі 45. Однак математичних моделей для прогнозування конструктивно-технологічних факторів вібраційно-відцентрового зміцнення залежно від необхідних геометричних параметрів якості поверхні у попередніх дослідженнях встановлено не було.

Постановка завдання статті. Мета роботи – визначення раціональних режимів вібраційно-відцентрового зміцнення під час оздоблювально-вікінчувального оброблення виробів із конструкційних сталей, зокрема сталі 45; побудова емпіричних залежностей, які дозволяють б прогнозувати значення геометричних параметрів якості поверхні довгомірних виробів (хвилястості, шорсткості, величини опорної поверхні) у разі вибраних інтервалів зміни основних технологічних факторів методу ВВЗ.

Методика виконання експериментальних досліджень. Матеріали та експериментальні зразки. Аналіз літературних джерел свідчить, що відповідальні довгомірні вироби форми тіл обертання, які експлуатують в умовах знакозмінних і ударних навантажень, інтенсивного зношування, здебільшого виготовляють із конструкційних сталей із вмістом вуглецю 0,3–0,5 % (так

званих покращених вуглецевих сталей) та легованих покращених сталей [1]. Тому для виконання експериментальних досліджень використовували переважно експериментальні зразки із конструкційної покращеної сталі 45.

Експериментальні дослідження стосовно геометричних параметрів якості поверхні довгомірних виробів виконували на експериментальних зразках кільцевої форми; для забезпечення відповідних вимог здійснення експериментальних досліджень посадні місця зразків і елементів додаткового спорядження обробляли достатньо точно та якісно.

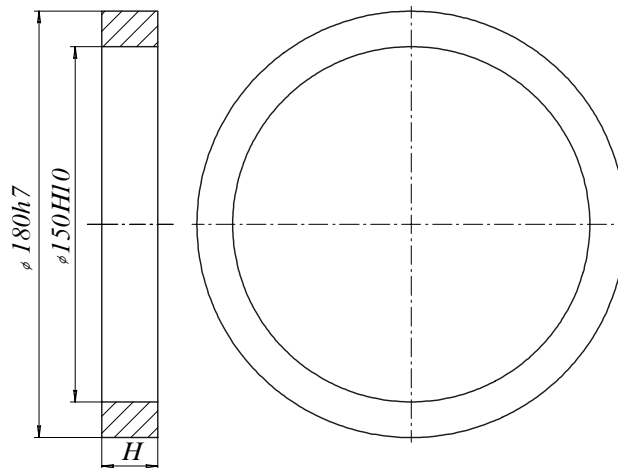


Рис. 1. Кільцевий експериментальний зразок для дослідження фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару.

Вібраційно-відцентровий зміцнювальний пристрій та технологічне оснащення. Враховуючи поставлені завдання досліджень, спроектовані зміцнювальні пристрої для оброблення внутрішніх та зовнішніх поверхонь довгомірних циліндричних виробів, опис конструкції та принцип роботи яких наведено в [1, 6]. Електромагнітні зміцнювальні пристрої, що реалізують метод ВВЗ, містять привод, пружно-коливну систему із робочими органами та допоміжні елементи. Пружно-коливна система складається із торсіонів, до яких приєднано робочий орган – зміцнювач у вигляді диска-сепаратора із деформівними тілами – кульками, роликами тощо. Складники електромагнітного приводу та елементи ударних систем приєднані до базового елемента пристрою – основи (у вигляді диска) так, що утворюють дві незалежні пружно-коливні системи: основа-складник електромагнітного приводу (якір чи статор) – зміцнювач, приєднаний до відповідного складника приводу. Зміцнювальний пристрій за допомогою спеціального спорядження встановлюють на внутрішню (зовнішню) поверхню деталі на напрямних елементах – гумових роликах. У разі подачі напруги на котушки електромагнітів статора за рахунок сили електромагнітного притягання якір притягується по чергово до кожного з них. Коливні рухи статора та якоря відбуваються у протифазі. Зміцнювачі, що приєднані до статора та якоря, починають здійснювати коливально-обкатні рухи, які супроводжуються ударами по внутрішній (зовнішній) поверхні оброблюваної деталі виступаючими деформівними тілами. У кожен проміжок часу контактування деталі із зміцнювачами відбувається через незначну кількість деформівних тіл, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі, що призводить до розвитку великих контактних напружень у матеріалі оброблюваної деталі в місцях контакту, внаслідок чого відбувається нагартування поверхневого шару матеріалу деталі і процес зміцнення.

Для виконання експериментальних досліджень стосовно визначення геометричних параметрів якості поверхні було розроблено уставу, принципова схема якої наведена на рис. 2.

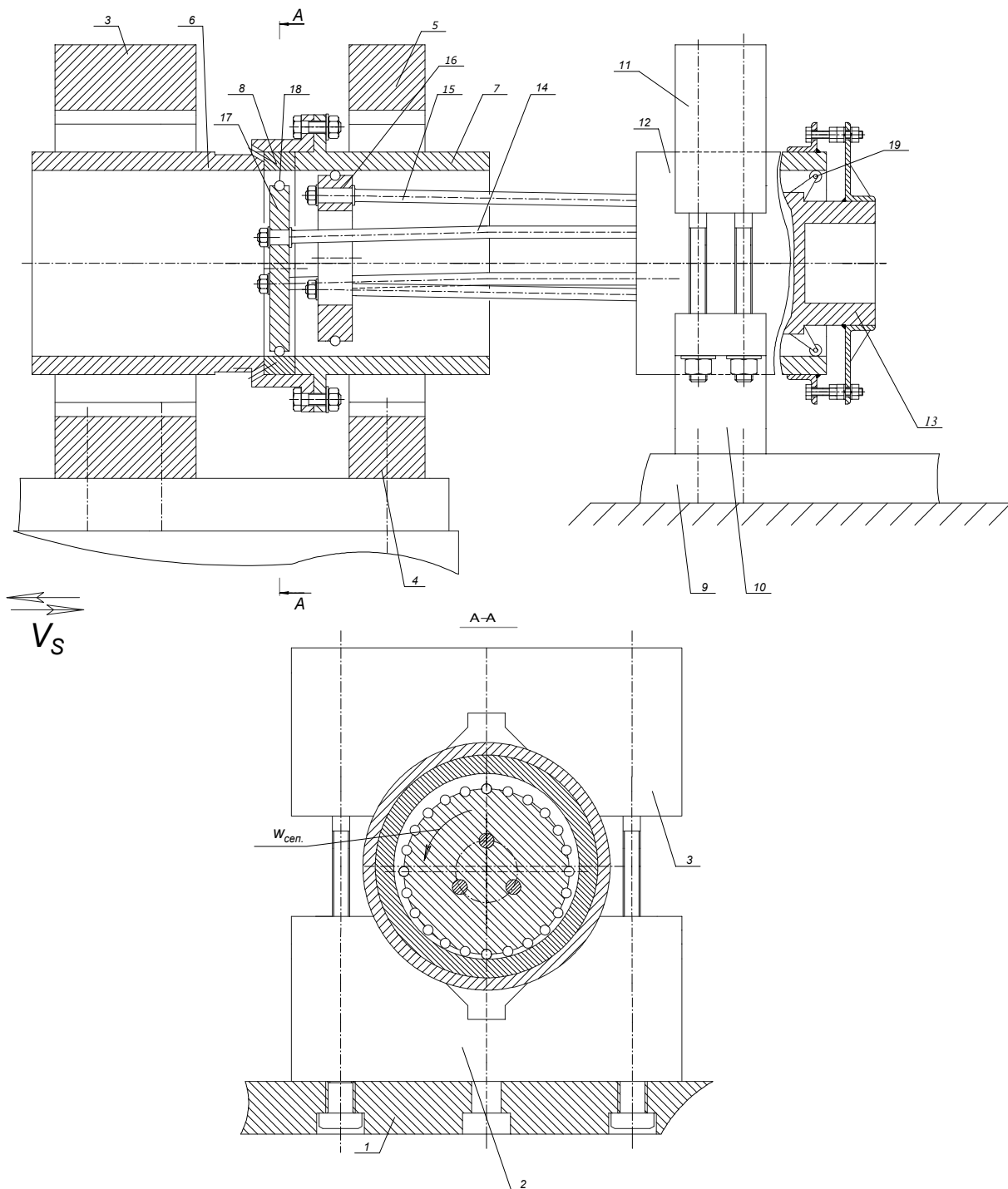


Рис. 2. Принципова схема устави для дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу ВВЗ на геометричні параметри якості поверхні

Для устави використали столи вертикально-фрезерного верстата мод. 6P12 та горизонтально-фрезерного верстата мод. 6H81. Фрагменти довгомірної деталі 6, 7 із приєднаним до них експериментальним зразком 8 за допомогою призм 2, 3, 4, 5 та відповідних приєднувальних елементів закріплювали до столу 1 горизонтально-фрезерного верстата. Зміцнювальний інструмент на напрямних роликах 19 основи 13 базується на внутрішній циліндричній поверхні фрагмента 12,

який закріплений на призмах 10, 11 до столу 9 вертикально-фрезерного верстата. За допомогою руху поздовжньої подачі столу 1 в автоматичному чи ручному режимі зміцнювальний пристрій розміщують у фрагменті 7 так, щоб диски-сепаратори 16, 17 перебували перед зразком 8. У разі подачі живлення на котушки електромагнітів між складниками електромагнітного приводу (на принциповій схемі не показано) виникає електромагнітне поле. Складники приводу здійснюють кругові плоско-паралельні коливання, які за допомогою пружної системи на торсіонах 14, 15 передаються робочим органам інструменту – дискам-сепараторам 16, 17 із деформівними тілами 18. При забезпеченні необхідної амплітуди коливань диски-сепаратори починають виконувати коливально-обкатні рухи, що супроводжуються поверхневим пластичним деформуванням матеріалу фрагмента 7 та його нагартуванням. За рахунок подачі столу диски-сепаратори 16, 17 вступають в контакт із оброблюваною поверхнею зразка 8 і здійснюють його оброблення. Можливі схеми оброблення зразків (одним сепаратором, комбіноване, одно-, багатопрхідне тощо) визначається поставленим завданням експериментальних досліджень та матрицями планування експериментів.

Методика досліджень. Режимми зміцнення деталей ППД призначають на підставі дослідно-емпіричних залежностей, які характеризують зв'язок основних технологічних параметрів оздоблювально-викінчувальної технологічної операції та параметрів якості чи експлуатаційних характеристик деталей машин, або шляхом використання деформаційного критерію, який характеризує граничну інтенсивність деформації оброблюваних поверхонь. Взаємний вплив режимів оброблення ВВЗ на геометричні параметри якості поверхневого шару виробів через складність теоретичного прогнозування процесів оброблення доцільно досліджувати експериментально.

Вплив технологічних параметрів методу ВВЗ на геометричні параметри якості поверхні досліджували згідно з складеними на підставі теорії планування багатофакторних експериментів матриць планів, зокрема повного факторного експерименту 2^3 [1]. Під час оброблення зразків із покращеної вуглецевої сталі 45 електромагнітним вібраційно-відцентровим зміцнювачем контролювали геометричні параметри якості поверхні, з яких у цій роботі виділено параметр шорсткості R_a , за різних умов оброблення. Основними технологічними параметрами під час оброблення експериментальних зразків із сталі 45 прийнято: зведену жорсткість ділянок пружних систем $c_{звед}$.

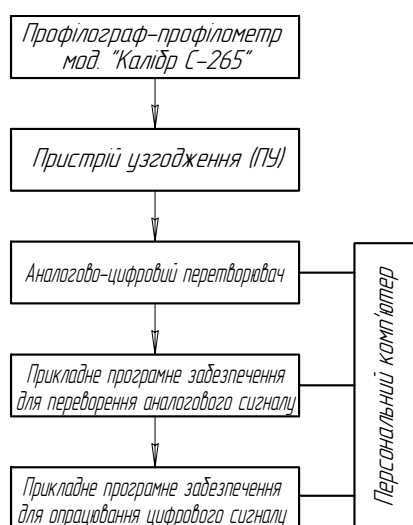


Рис. 3. Принципова схема вимірного комплексу для виконання експериментальних досліджень

(фактор X_1), масу робочого органа зміцнювального інструменту $m_{2(4)}$ (фактор X_2) та швидкість подачі V_S (фактор X_3). Інші фактори стабілізовані: амплітуда коливань виконавчого органа зміцнювального пристрою $A = 1,5$ мм; сила струму на котушках електромагнітів $I = 1,0$ А; кількість проходів $n = 1$. На підставі рекомендацій літературних джерел і пробних проходів під час оброблення ВВЗ прийняті такі межі зміни факторів: $c_{звед} = 3,317 \cdot 10^5 - 7,471 \cdot 10^5$ Н/м; $m_{2(4)} = 1,8 - 3,0$ кг; $V_S = 35 - 135$ мм/хв.

Вимірювали параметри шорсткості за допомогою вимірного комплексу, принципова схема якого наведена на рис. 3, а фотографія – на рис. 4, опрацювання профілограм з метою підвищення точності і зменшення трудомісткості розрахунку топографічних характеристик мікрогеометрії поверхневого шару на основі

профілограм виконували під час використання комп'ютерної програми *Roughness Plot Analyzer* [3]. Обробляли результати експериментальних досліджень згідно з методикою [8, 9].



Рис. 4. Комплекс для вимірювання геометричних параметрів якості поверхні виробів

Статистичне опрацювання результатів досліджень. Обробляли результати експериментальних досліджень згідно з методикою [8, 9]. Математична залежність у кодованих змінних для визначення параметра шорсткості R_a під час оброблення методом ВВЗ за допомогою електромагнітного пристрою з пружними системами після перевірки однорідності дисперсій відтворюваності у дослідях за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресій за допомогою критерію Стьюдента та адекватності математичних моделей у разі використання критерію Фішера матиме вигляд

$$Y_{Ra} = 0,56919 - 0,14111 \cdot X_1 - 0,13386 \cdot X_2 + 0,28002 \cdot X_3 + 0,05335 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,04287 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (1)$$

На підставі аналізу результатів дисперсійного аналізу, за величиною та знаком коефіцієнтів регресії із математичної залежності (1) можна зробити такі висновки. Найбільший вплив на параметр шорсткості $\ln(R_a)$ обробленої поверхні довгомірного виробу має швидкість подачі (фактор X_3), потім зведена жорсткість ділянок пружних систем (фактор X_1) і маса робочого органа зміцнювача (фактор X_2). Найменше впливають на параметр шорсткості $\ln(R_a)$ взаємодії $X_1 X_3$ і $X_1 X_2 X_3$. Збільшення швидкості осьової подачі V_S електромагнітного зміцнювача викликає збільшення величини $\ln(R_a)$, а збільшення зведеної жорсткості пружних систем $c_{звед.}$ і маси робочого органа зміцнювального пристрою $m_{2(4)}$ сприяє зменшенню $\ln(R_a)$. Величина $\ln(R_a)$ збільшуватиметься, якщо фактори X_1, X_3 та X_1, X_2, X_3 перебувають одночасно на верхніх або нижніх рівнях.

Математична залежність для визначення параметра шорсткості R_a під час оброблення вібраційно-відцентровим зміцненням циліндричних зразків із сталі 45 з урахуванням тільки значущих коефіцієнтів регресії як функцій основних технологічних параметрів і їх взаємодій має вигляд

$$R_a = \left(8,00163 \cdot 10^{-7}\right) \cdot \left(c_{\text{прув.}}\right)^{1,01346 - 2,59092 \cdot \ln(m_{\text{роб.орг.}})} \cdot \left(m_{\text{роб.орг.}}\right)^{33,46353} \times \\ \times \left(V_S\right)^{4,6353 - 0,32173 \cdot \ln(c_{\text{прув.}}) - 8,03430 \cdot \ln(m_{\text{роб.орг.}}) + 0,61247 \cdot \ln(c_{\text{прув.}}) \cdot \ln(m_{\text{роб.орг.}})} \quad (2)$$

На підставі формули (2) можна побудувати низку графічних залежностей впливу основних технологічних параметрів методу ВВЗ на середнє арифметичне відхилення профілю R_a як однієї з основних характеристик геометричного параметра якості поверхні – шорсткості під час використання зміцнювальних пристроїв з електромагнітним приводом.

На рис. 5 наведено графічні залежності впливу V_S на середнє арифметичне відхилення профілю R_a при сталих значеннях $c_{\text{звед.}}$ та $m_{2(4)}$: графік 1 при $c_{\text{звед.}} = 3,317 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 1,8$ кг; графік 2 при $c_{\text{звед.}} = 3,317 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг; графік 3 при $c_{\text{звед.}} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 1,8$ кг; графік 4 при $c_{\text{звед.}} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг.

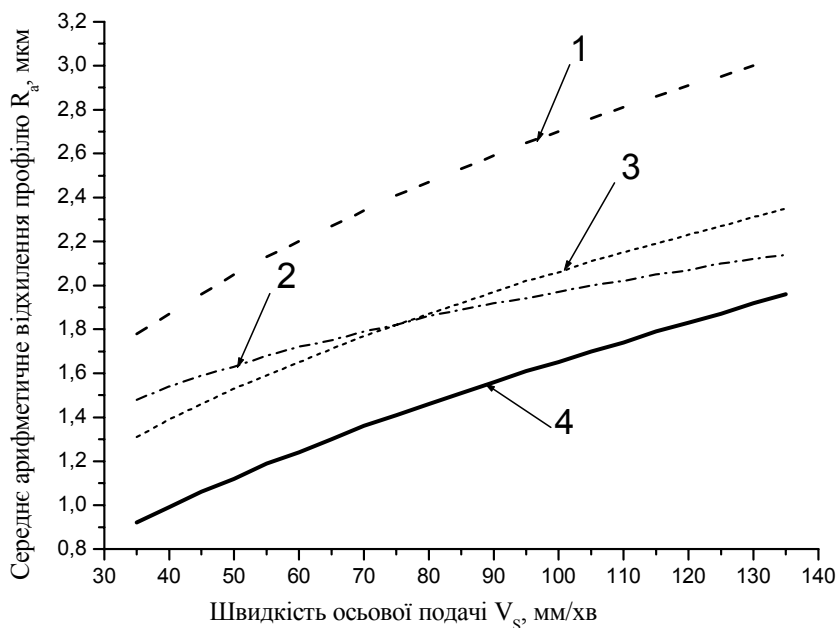


Рис. 5. Вплив швидкості осьової подачі V_S зміцнювального пристрою на зміну значення середнього арифметичного відхилення профілю R_a обробленої поверхні деталі із сталі 45

Загальні висновки та перспективи подальших досліджень. На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (2) і графічних залежностей (рис. 5) можна зробити такі висновки:

1) за необхідності забезпечення найменшого значення параметра R_a поверхневого шару циліндричних деталей машин із конструкційних матеріалів, зокрема із сталі 45, за умови здійснення одного робочого проходу інструменту, оброблення методом ВВЗ під час використання електромагнітних зміцнювальних пристроїв із пружними системами необхідно проводити при таких оптимальних технологічних параметрах: $c_{\text{звед.}} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг, $V_S = 35$ мм/хв;

2) збільшення швидкості осьової подачі V_S при фіксованих значеннях зведеної жорсткості ділянок пружних систем $c_{звед.}$ і маси робочого органа зміцнювального інструменту $m_{2(4)}$ сприяє погіршенню шорсткості поверхневого шару;

3) при масі робочого органа зміцнювального інструменту $m_{2(4)} = 1,8$ кг у разі збільшення швидкості осьової подачі V_S зростання значення середнього арифметичного відхилення профілю R_a відбувається стрімкіше у разі збільшення зведеної жорсткості ділянок пружних систем $c_{звед.}$ із $3,317 \cdot 10^5$ Н/м до $7,471 \cdot 10^5$ Н/м;

4) при масі робочого органа зміцнювального інструменту $m_{2(4)} = 3,0$ кг при збільшенні швидкості осьової подачі V_S зростання значення середнього арифметичного відхилення профілю R_a відбувається стрімкіше у разі зменшення зведеної жорсткості ділянок пружних систем $c_{звед.}$ із $3,317 \cdot 10^5$ Н/м до $7,471 \cdot 10^5$ Н/м.

Отримані емпіричні залежності, з яких у цій роботі наведена (2) як типова, дозволяють прогнозувати значення геометричних показників якості поверхні довгомірних циліндричних деталей із конструкційних сталей, зокрема із сталі 45, залежно від технологічних параметрів методу ВВЗ у межах інтервалів їх зміни. Виконання подальших досліджень у цьому напрямку, зокрема постановка повного факторного експерименту плану 2^5 та розширення діапазону зміни технологічних параметрів, сприятиме уточненню емпіричних залежностей із врахуванням значимості усіх факторів.

1. Кусий Я.М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Львів, 2002. – 260 с. – Рукопис. 2. Яцерицын П.И., Минаков А.П. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с. 3. Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Свіч А., Собачек А., Юрчишин І.І. Огляд технологій вікінчувального оброблення довгомірних стержневих виробів // Вісн. Житомир. інж.-технол. ін-ту. Спец. вип. за матеріалами II Міжнар. наук.-техн. конф. “Процеси механічної обробки, верстати та інструменти”. – Житомир, 2001. – С. 60–68. 4. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с. 5. Широков В.В., Арндар Л.А., Ковальчик Ю.І., Василів Х.Б., Василів О.М. Комп’ютерний обробіток профілограм фрикційних поверхонь // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2005. – № 1. – С. 93–96. 6. Кусий Я.М., Баранецька О.Р. Аналіз впливу технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 442: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – С. 43–52. 7. Афтаназів І.С., Кусий Я.М., Баранецька О.Р., Широков В.В. Вплив технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювального оброблення на фізичні параметри якості довгомірних циліндричних деталей із сталі 45 // Матеріали II Міжнар. наук.-техн. конф. “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях”. – Славсько, 26 лютого – 1 березня 2002 р. – С. 114. 8. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982 – 173 с. 9. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.