

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.9.048.6

Я.М. Кусий, В.Г. Топільницький *, О.Т. Велика *
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування,
* кафедра електронного машинобудування

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Кусий Я.М., Топільницький В.Г., Велика О.Т., 2007

Досліджено вплив технологічних параметрів методу вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) стосовно довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів. Викладено методику досліджень, наведено принципову схему устави для дослідження впливу основних технологічних параметрів методу ВВЗ на фізико-механічні параметри якості поверхні. Проаналізовано емпіричні та графічні залежності впливу технологічних параметрів методу ВВЗ на фізико-механічні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей із 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 physical properties quality of long-sized cylindrical details, which are manufactured of constructional materials, are analysed.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Вирішення проблем забезпечення надійності, підвищення довговічності та конкурентоспроможності виробів при мінімальній собівартості їх виготовлення вимагає системного підходу в умовах ринкових відносин. Рівень розвитку сучасних технологій визначається не лише продуктивністю використовуваного обладнання та прогресивними конструкціями інструментів, а й оптимальними режимами оброблення. Власне раціонально вибрані технологічні параметри не лише забезпечують точність та якість оброблюваних поверхонь, а й сприяють формуванню необхідних експлуатаційних характеристик виробів, зокрема на фінішних та оздоблювально-викінчувальних операціях.

Успішне розв'язання завдання підвищення довговічності довгомірних деталей форми тіл обертання, що поширені в конструкціях деталей машин [1], тісно пов'язане із вдосконаленням технології виготовлення цих виробів та керуванням показниками якості оброблюваних поверхонь. У Національному університеті “Львівська політехніка” під керівництвом д-ра техн. наук, професора І.С. Афтаназіва розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ), що ґрунтується на поверхневому пластичному деформуванні (ППД) оброблюваних поверхонь, спроектовано та ви-

готовлено реалізуюче його технологічне обладнання, яке здатне, на нашу думку, ефективно вирішити проблему технологічного забезпечення фізико-механічних параметрів якості довгомірних деталей, зокрема під час оброблення їх внутрішніх циліндричних поверхонь.

Важливе значення у прискореному розвитку поверхневого зміцнення належить державним програмам розвитку машинобудування України. Проте, тези концепції “Програми прискореного розвитку галузей машинобудування” (Міністерство освіти і науки України, НАН України) не достатньо відображають актуальність та пріоритетність технологій поверхневого зміцнення. Проекти державних програм розвитку машинобудування України не визначають проблему зміцнювального оброблювання одним із головних пріоритетів, чим вже тепер закладають відставання України від світового рівня, постійну залежність від зарубіжної продукції, постійний дефіцит матеріалів, інструментів та енергоносіїв [2].

Роботу стосовно вибору раціональних режимів вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин із конструкційних матеріалів виконували відповідно до координаційного плану Комітету з питань науки і техніки та Міністерства освіти і науки України “Ресурсозбережливі та ощадні технології” на 1995–2005 рр. у межах держбюджетних науково-дослідницьких тем ДБ ”Концентратор” “Дослідження технології та розроблення оснащення для забезпечення надійності і довговічності деталей із концентраторами напружень” і ДБ ”Зміцнення” “Дослідження впливу поверхневого зміцнення зубчастих коліс на довговічність передач, розробка зміцнювальних технологій і реалізуючого їх обладнання” у Національному університеті “Львівська політехніка” на кафедрі технологій машинобудування Інституту інженерної механіки та транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв’язання даної проблеми. У роботах [3–5] відзначається, що відмінності у якості поверхонь після традиційних фінішних операцій і після оброблення ППД настільки істотні, що здебільшого їх повинен враховувати конструктор під час проектування деталей машин і приладів, технолог під час розроблення технологічних процесів та конструктор під час проектування інструментів для оздоблювально-викінчувального оброблення ППД.

Поряд з тим, в переважній більшості робіт науковців у галузі ППД, наведені результати стосовно впливу методів зміцнювального оброблення лише на зміну геометричних параметрів якості поверхневого шару матеріалу.

Зокрема проблемам технологічного забезпечення геометричних параметрів якості поверхні присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених і дослідників у 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. Технологічне ж забезпечення фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару матеріалу (мікротвердість, глибина зміцненого шару, ступінь нагартування, залишкові напруження) досліджено недостатньо. Не розроблено універсальних методів, які можна було б ефективно застосовувати для оброблення як зовнішніх, так і внутрішніх циліндричних поверхонь значної довжини та діаметральних розмірів, реалізувати комбіновану обробку поверхонь довгомірних виробів із забезпеченням достатніх, з огляду довговічності й надійності, значень товщини зміцненого шару, поверхневої мікротвердості, залишкових напружень тощо. Обмежений, при цьому, і арсенал оригінальних конструкцій зміцнювальних пристроїв для оброблення таких виробів і відсутні рекомендації стосовно вибору раціональних, з погляду забезпечення експлуатаційних характеристик, режимів оброблення.

Поряд з тим дослідження І.В. Кудрявцева, Д.Д. Папшева, П.А. Чепа та інших науковців свідчать, що істотний вплив на експлуатаційні властивості деталей машин: міцність, зносостійкість, втомну міцність тощо мають фізико-механічні параметри якості поверхні. При тому структура поверхневого шару, як правило, визначається фінішними, хіміко-термічними чи оздоблювально-викінчувальними операціями.

У Національному університеті “Львівська політехніка” проведено низку експериментальних досліджень 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 сталі 45. Однак отримані математичні залежності для прогнозування технологічних параметрів оздоблювально-викінчувального оброблення мають лінійний характер, що не дозволяє адекватно оцінити результати експериментальних досліджень.

Постановка завдання статті. Мета роботи – визначення раціональних режимів вібраційно-відцентрового зміцнення при оздоблювально-викінчувальному обробленні виробів із конструкційних сталей, зокрема сталі 45; побудова емпіричних залежностей, які дозволяють б прогнозувати значення фізико-механічних параметрів якості поверхні довгомірних виробів (мікротвердості, товщини зміцненого шару та ступеня зміцнення) при вибраних інтервалах зміни основних технологічних факторів методу ВВЗ.

Методика проведення 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 покращуваних вуглецевих сталей) та легованих покращуваних сталей [1]. Тому для проведення експериментальних досліджень використовували в основному експериментальні зразки із конструкційної покращуваної сталі 45 (ГОСТ 1050-74).

Експериментальні дослідження стосовно фізико-механічних параметрів якості поверхні довгомірних виробів проводили на експериментальних зразках призматичної та кільцевої форми. Призматичні зразки розточували сумісно із трубою-еталоном і встановлювали на досліджуваній довгомірній деталі за допомогою спеціального пристрою (рис. 1). Торці зразків цього типу шліфували із забезпеченням шорсткості $R_a = 0,4 \div 0,63$ мкм, що спрощує процес підготовки шліфів для подальших вимірювань. Недолік таких зразків полягає у відносній складності як виготовлення зразків, так і забезпечення просторового розташування зразка щодо геометричної осі виробу, крім того дослідження характеру розподілу фізико-механічних параметрів якості по довжині кола у заданому осьовому перерізі вимагає значної кількості зразків. Кільцеві зразки (рис. 2) позбавлені вказаних недоліків, проте в цьому випадку для забезпечення відповідних вимог проведення експериментальних досліджень необхідно достатньо точно та якісно обробити посадні місця зразків і елементів додаткового спорядження.

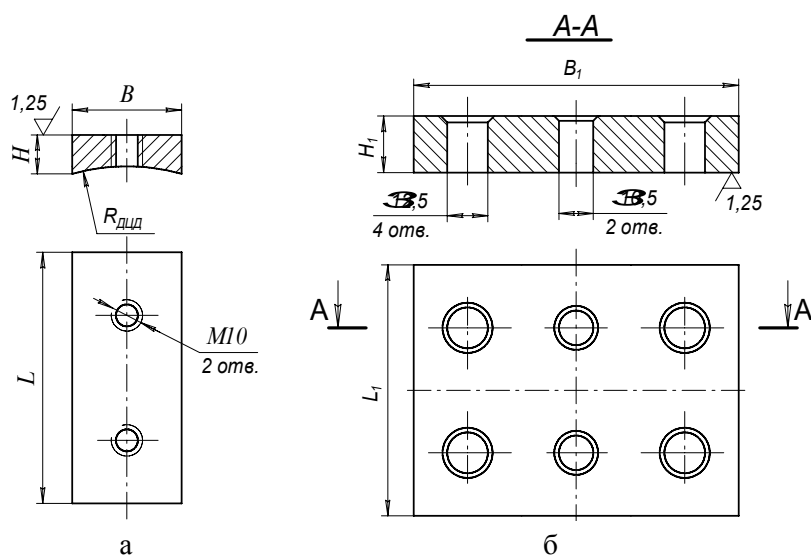


Рис. 1. Зразок призматичний (а) і пристрій для його закріплення (б)

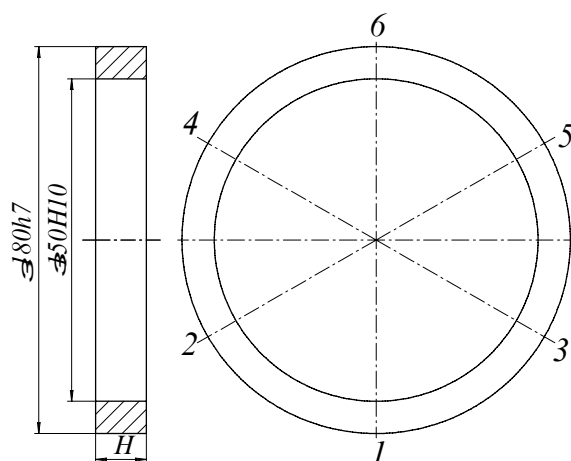


Рис. 2. Кільцевий експериментальний зразок для дослідження фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару

Вібраційно-відцентровий зміцнювальний інструмент та технологічне оснащення. Враховуючи поставлені задачі 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 привід, 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. При 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 відбувається зміцнення.

Експериментальні дослідження з визначення фізико-механічних параметрів якості проводили на зразках із сталі 45 ГОСТ 1050-74, з яких вирізали фрагменти та готували за стандартною методикою шліфи для подальших вимірювань параметрів зміцнення.

Для проведення експериментальних досліджень стосовно визначення фізико-механічних параметрів якості поверхні було розроблено устаткування (рис. 3), для якої 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 ґрунтується на внутрішній циліндричній поверхні фрагменту 12, який закріплений на призмах 10, 11 до столу 9 вертикально-фрезерного верстата. За допомогою руху позовжньої подачі столу 1 в автоматичному чи ручному режимі зміцнювальний пристрій розміщують у фрагменті 7 так, щоб диски-сепаратори 16, 17 знаходилися перед зразком 8. При 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 інструмента – диском-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 фрагменту 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-, багатопрохідне тощо) визначається поставленим завданням експериментальних досліджень та матрицями планування експериментів.

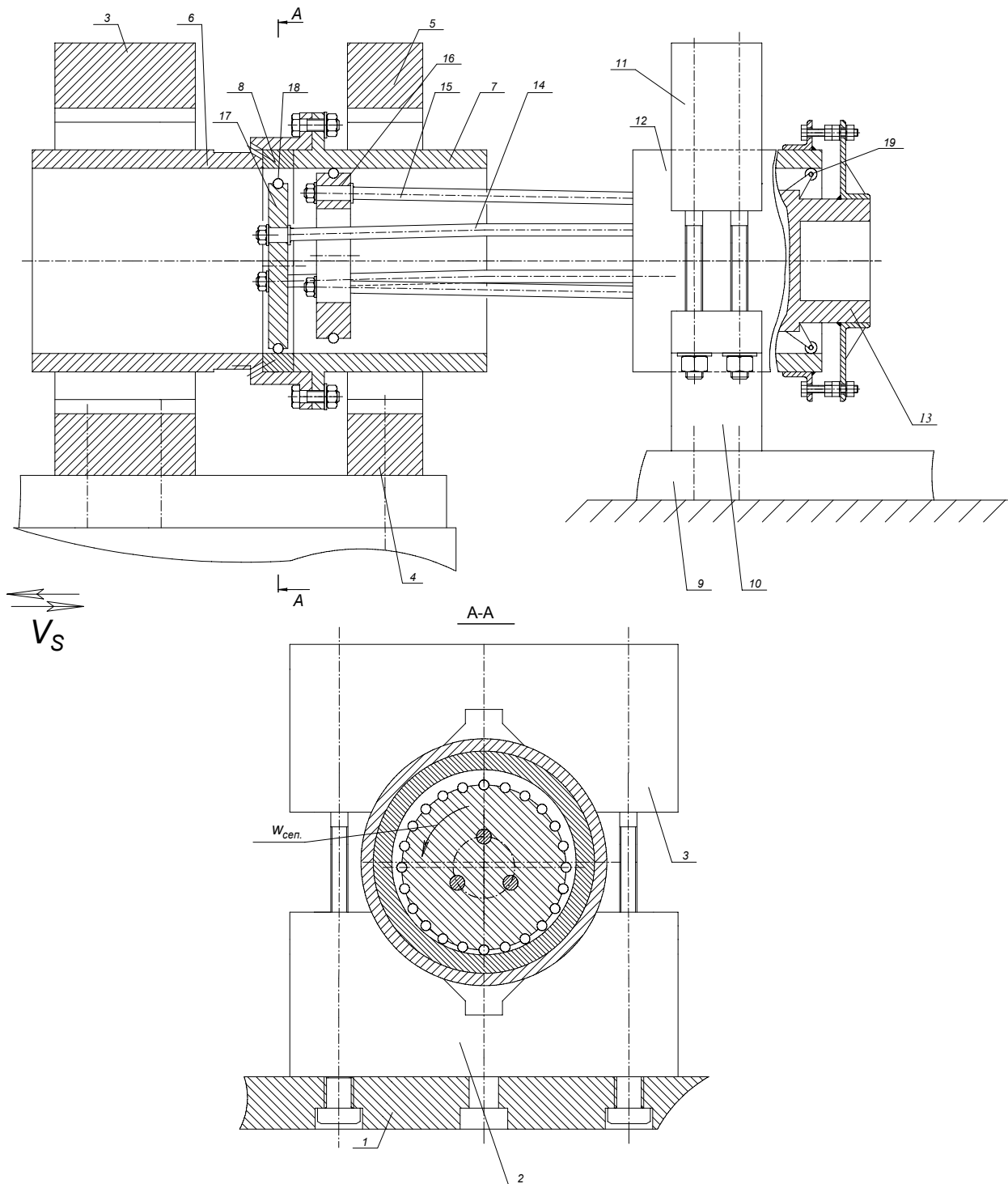


Рис. 3. Принципова схема устави для дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу ВВЗ на фізико-механічних параметри якості поверхні

Методика досліджень. Режими 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 за допомогою використання деформаційного критерію, який характеризує граничну інтенсивність деформації оброблюваних поверхонь. Взаємний вплив режимів оброблення ВВЗ на фізико-механічні параметри якості поверхневого шару виробів через складність теоретичного прогнозування процесів оброблення доцільно досліджувати експериментально.

Вплив технологічних параметрів методу ВВЗ на фізико-механічні параметри якості поверхні досліджували згідно з складеними на підставі теорії планування багатofакторними експериментами матриць планів, зокрема повного факторного експерименту 2^3 [1, 8, 9]. При обробленні зразків із покращуваної вуглецевої сталі 45 ГОСТ 1050-74 електромагнітним вібраційно-відцентровим зміцнювальним пристроєм контролювали фізико-механічні параметри якості поверхні: максимальне значення мікротвердості $H\mu$, товщину зміцненого поверхневого шару a та ступінь зміцнення ε при різних умовах оброблення. Основними технологічними параметрами при обробленні експериментальних зразків із сталі 45 прийнято: зведену жорсткість ділянок пружних систем $c_{звед.}$ (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.

Статистичне опрацювання результатів досліджень. Оброблення результатів експериментальних досліджень проводили згідно з методикою [8, 9]. Математичні залежності у кодованих змінних для визначення фізико-механічних параметрів якості при обробленні 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 під час використання критерію Фішера матимуть вигляд:

$$Y_{H\mu} = 7,6705 + 0,0205 \cdot X_1 + 0,011 \cdot X_2 - 0,0222 \cdot X_3 - 0,0093 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,0125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

$$Y_a = -2,1245 + 0,2999 \cdot X_1 - 0,371 \cdot X_3 - 0,0631 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,139 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2)$$

$$Y_\varepsilon = 2,5135 + 0,1828 \cdot X_1 + 0,0829 \cdot X_2 - 0,1936 \cdot X_3 - 0,0989 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

На підставі аналізу результатів дисперсійного аналізу, за величиною та знаком коефіцієнтів регресії із математичних залежностей (1)–(3) можна зробити такі висновки:

- найбільший вплив на параметр мікротвердості $H\mu$ обробленої поверхні виробу має швидкість подачі (фактор X_3) та зведена жорсткість ділянок пружних систем (фактор X_1), потім – взаємодія $X_1 X_2 X_3$, маса робочого органа зміцнювального пристрою (фактор X_2) і взаємодія $X_2 X_3$. Збільшення швидкості осьової подачі V_S зміцнювального пристрою викликає зменшення величини $\ln(H\mu)$, а збільшення зведеної жорсткості пружних систем $c_{звед.}$ і маси робочого органа зміцнювального пристрою $m_{2(4)}$ сприяє збільшенню $\ln(H\mu)$. Величина $\ln(H\mu)$ буде зменшуватися, якщо фактори X_1 , X_2 , X_3 та X_2 , X_3 знаходяться одночасно на верхніх або нижніх рівнях;

- найбільший вплив на товщину зміцненого шару a обробленої поверхні довгомірної деталі має швидкість подачі (фактор X_3), зведена жорсткість ділянок пружних систем (фактор X_1) та маса (фактор X_2) через вплив взаємодій $X_1X_2X_3$ і X_1X_2 . Із збільшенням швидкості осьової подачі V_S величина $\ln(a)$ зменшується, а збільшення зведеної жорсткості пружних систем $c_{звед.}$ викликає збільшення $\ln(a)$, причому товщина зміцненого шару a залежить переважно від цих двох факторів. Величина $\ln(a)$ зменшуватиметься, якщо фактори X_1, X_2, X_3 та X_1, X_2 знаходяться одночасно на верхніх або нижніх рівнях;
- найбільший вплив на ступінь зміцнення ε обробленої поверхні має швидкість подачі (фактор X_3) та зведена жорсткість ділянок пружних систем (фактор X_1), потім вплив взаємодії $X_1X_2X_3$ і маса робочого органа зміцнювального пристрою (фактор X_2). Збільшення швидкості осьової подачі V_S пристрою спричиняє зменшення величини $\ln(\varepsilon)$, а збільшення зведеної жорсткості пружних систем $c_{звед.}$ і маси робочого органа зміцнювального пристрою $m_{2(4)}$ сприяє збільшенню $\ln(\varepsilon)$. Величина $\ln(\varepsilon)$ буде зменшуватися, якщо фактори X_1, X_2, X_3 знаходяться одночасно на верхніх або нижніх рівнях.

Математичні залежності для прогнозування фізико-механічних параметрів якості поверхневих шарів деталі під час оброблення методом ВВЗ за допомогою зміцнювального пристрою із пружними системами з врахуванням лише значимих коефіцієнтів регресій як функції основних технологічних параметрів і їх взаємодій мають вигляд:

$$H\mu = e^{15,266} \cdot (c_{прув.})^{-0,5865+0,7552 \cdot \ln(m_{2(4)})} \cdot (m_{2(4)})^{-9,625} \times (V_S)^{-1,9609+0,1506 \cdot \ln(c_{прув.})+2,2857 \cdot \ln(m_{2(4)})-0,1785 \cdot \ln(c_{прув.})} \cdot \ln(m_{2(4)}) \quad (4)$$

$$a = e^{76,6829} \cdot (c_{прув.})^{-5,8305+7,7879 \cdot \ln(m_{2(4)})} \cdot (m_{2(4)})^{-102,1594} \times (V_S)^{-22,5126+1,6743 \cdot \ln(c_{прув.})+26,0376 \cdot \ln(m_{2(4)})-1,9849 \cdot \ln(c_{прув.})} \cdot \ln(m_{2(4)}) \quad (5)$$

$$\varepsilon = e^{63,6578} \cdot (c_{прув.})^{-4,5895+5,9748 \cdot \ln(m_{2(4)})} \cdot (m_{2(4)})^{-78,0519} \times (V_S)^{-15,9159+1,1915 \cdot \ln(c_{прув.})+18,5287 \cdot \ln(m_{2(4)})-1,4125 \cdot \ln(c_{прув.})} \cdot \ln(m_{2(4)}) \quad (6)$$

На підставі формул (4)–(6) можна побудувати низку графічних залежностей впливу основних технологічних параметрів методу ВВЗ на фізико-механічні параметри якості поверхні (мікротвердість, товщину зміцненого шару та ступінь зміцнення) під час використання зміцнювальних пристроїв з електромагнітним приводом.

На рис. 4–6 зображено графічні залежності впливу V_S на мікротвердість, товщину зміцненого шару і ступінь зміцнення при сталих значеннях $c_{звед.}$ та $m_{2(4)}$: графік 1 при $c_{звед.} = 3,317 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 1,8$ кг; графік 2 при $c_{звед.} = 3,317 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг; графік 3 при $c_{звед.} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 1,8$ кг; графік 4 при $c_{звед.} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг.

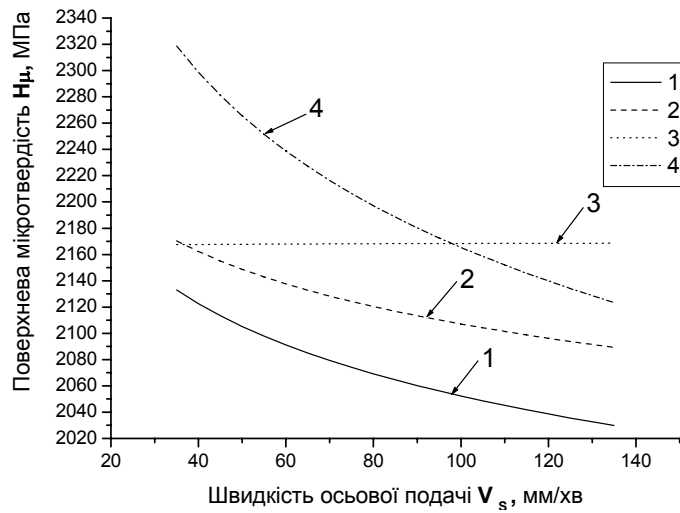


Рис. 4. Вплив швидкості осьової подачі V_S змінювального пристрою на зміну максимальної мікротвердості H_{μ} обробленої поверхні деталі із сталі 45

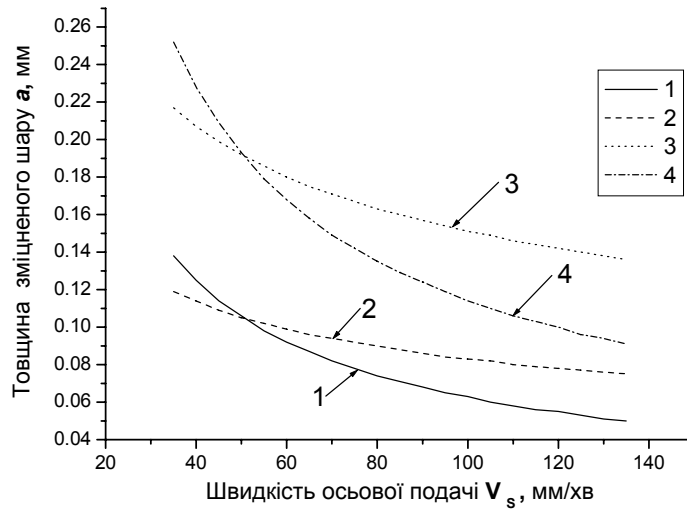


Рис. 5. Вплив швидкості осьової подачі V_S змінювального пристрою на зміну товщини зміцненого шару a обробленої поверхні деталі із сталі 45

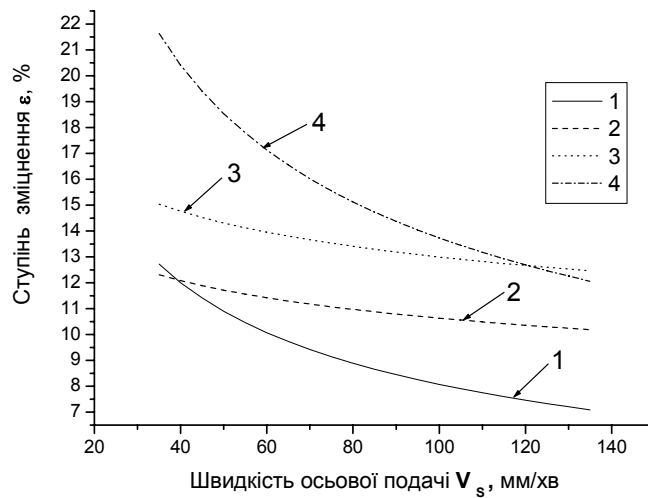


Рис. 6. Вплив швидкості осьової подачі V_S змінювального пристрою на ступінь зміцнення ε деталі із сталі 45

Загальні висновки та перспективи подальших досліджень. На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень, рівнянь регресій (4)–(6) і графічних залежностей (рис. 4–6) можна зробити такі висновки. За необхідності максимального підвищення зносостійкості та втомної міцності циліндричних деталей машин із конструкційних матеріалів, зокрема із сталі 45 (забезпечення максимальних значень H_{μ} , a та ε), за умови здійснення одного робочого проходу інструмента, оброблення методом ВВЗ при використанні електромагнітних зміцнювальних пристроїв із пружними системами необхідно проводити при таких оптимальних технологічних параметрах: $c_{звед.} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 3,0$ кг, $V_S = 35$ мм/хв. За необхідності забезпечення максимальної продуктивності праці на зміцнювальній технологічній операції, зберігаючи при цьому покращання експлуатаційних характеристик довгомірних деталей, оброблення потрібно проводити при таких режимах: $c_{звед.} = 7,471 \cdot 10^5$ Н/м, $m_{2(4)} = 1,8$ кг, $V_S = 135$ мм/хв.

Отримані емпіричні залежності (4)–(6) дозволяють прогнозувати значення фізико-механічних показників якості поверхні довгомірних циліндричних деталей із конструкційних сталей, зокрема із сталі 45 ГОСТ 1050-74, залежно від технологічних параметрів методу ВВЗ у межах інтервалів їх зміни. Проведення подальших досліджень у цьому напрямку, зокрема постановка повного факторного експерименту плану 2^5 та розширення діапазону зміни технологічних параметрів, сприятиме уточненню емпіричних залежностей (4)–(6) 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. – Львів, 2002. – 260 с. – Машинопис. 2. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104. 3. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с. 4. Яцерицын П.И., Минаков А.П. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с. 5. Кравченко Б.А., Самарин Ю.П., Курбатов В.П. Влияние деформационного упрочнения на выносливость деталей машин // Машиностроение. – 1993. – № 6. – С. 5–12. 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”. – Львів, 2002. – № 442. – 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. “Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах”. – Славсько, 26 лютого–1 березня 2002. – 114 с. 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.