

УДК 621.787.4

Маковей В. А.
Бородій Ю. П.
Проценко П. Ю.
Акімкін А. М.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ВАЛІВ ОБКОЧУВАННЯМ

Поверхнєве пластичне деформування використовується для формування необхідних експлуатаційних характеристик деталей. Прийнято вважати, що підвищення службових властивостей деталей в результаті обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) відбувається, головним чином, в результаті деформаційного зміцнення металу, виникнення в поверхневому прошарку напружень стиску та формування шорсткості поверхні з оптимальним профілем [1]. При ППД зменшується висота мікронерівностей (0,04 мкм) і утворюється поверхня з новим мікропрофілем [2]. Особливо важливою є інформація з величин та характеру розподілу в поверхневому прошарку накопиченої деформації та ресурсу пластичності [3]. Наведені залишкові поверхнєві напруження стиску стануть визначальними в підвищенні витривалості виробів.

При ремонті у важкому машинобудуванні ППД став одним з основних методів чистої обробки великих деталей. Це пояснюється його технологічними властивостями – високою продуктивністю при обробці поверхонь 7–10-го класу шорсткості, універсальністю, що дозволяє обробляти зовнішні, внутрішні і фасонні поверхні на металорізальних верстатах всіх основних типів, високою стійкістю і надійністю обкатного інструменту. При обробці незагартованих сталей і сплавів застосовують обкочування кулькою і роликком, а для високоміцних загартованих сталей і сплавів більш ефективним є алмазне вигладжування [2].

Крім того, у теперішній час набув розвиток напрямок підвищення зносостійкості високонавантажених елементів технологічного оснащення та транспортних засобів комбінованими зносостійкими покриттями. Формування їх відбувається багаторазовим електроіскровим легуванням та поверхневим пластичним деформуванням [4].

Для аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару використовують експериментально – розрахункові методи [1, 3], які вимагають великих витрат часу.

Метою роботи є оцінка впливу параметрів ППД на формування зміцненого шару шляхом моделювання методом скінченних елементів.

До основних параметрів ППД необхідно віднести площу контакту інструмента з валом, яка визначається діаметром кульки, тиск кульки на вал при обкочуванні, що визначається переміщенням кульки до вісі валу, кількість обертів валу та кульки, швидкість переміщення кульки вздовж валу, кількість проходів, величину сил тертя, механічні властивості матеріалу валу.

Оцінка можливості моделювання ППД. Спочатку провели встановлення можливості моделювання процесу ППД в пакеті Deform 3D в порівнянні з експериментом. Експериментальні дослідження процесу роликкового обкочування валу проводились в роботі [1], в якій було встановлено залежність напружень σ_X , σ_Y , σ_Z та τ_{XY} вздовж вісі вала. Обкочування

валу $D_B = 58$ мм, що обертався із частотою $n_B = 20$ хв⁻¹, виконувалось роликком $D_P = 100$ мм з радіусом профілю $R_{PP} = 3$ мм при подачі його вздовж осі $S = 0,17$ мм/о. Вал був виготовлений із сталі 45 з твердістю 180 НВ. Схема процесу обкочування показана на рис. 1.

Для встановлення можливості моделювання процесів ППД обкочуванням в програмному пакеті Deform 3D, що був наданий у тимчасове використання компанією «ТЕСИС», проведено моделювання вказаного вище процесу обкочування в даній програмі.

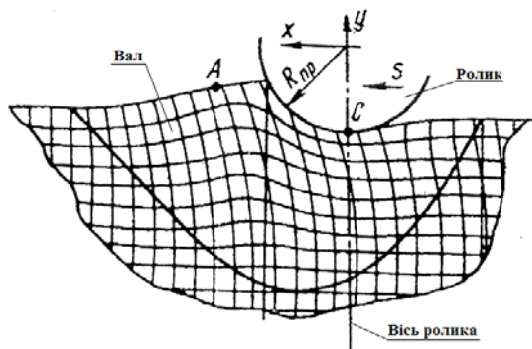


Рис. 1. Схема процесу ППД роликовим обкочуванням валу [1]

зана на рис. 3, а [5]), сила тертя та втискування ролика в заготовку в моделюванні могли відрізнитись від тих, що були в експерименті, так як в роботі [1] вони не вказуються. Значна різниця між формою графіків на рис. 2, а може бути викликана помилкою розрахунків в роботі [1]. Напруження на графіках як в експерименті, так і в моделюванні визначались на поверхні валу в місці деформування. В моделюванні втискування ролика в заготовку становило 0,7 мм, а тертя між роликом та заготовкою – 0,1.

Отримані в моделюванні графіки залежностей σ_x (рис. 2, а), σ_y (рис. 2, б), σ_z (рис. 2, в) та τ_{xy} (рис. 2, г) вздовж вісі валу порівнювались з такими ж графіками залежностей, що були визначені в ході експериментальних досліджень [1]. Порівняння графіків експерименту та моделювання показали, що їх форма є схожою. Відмінність між значеннями екстремумів на цих графіках може бути викликана тим, що характеристики матеріалу (крива зміцнення $\sigma_I - \varepsilon_I$, яка пока-

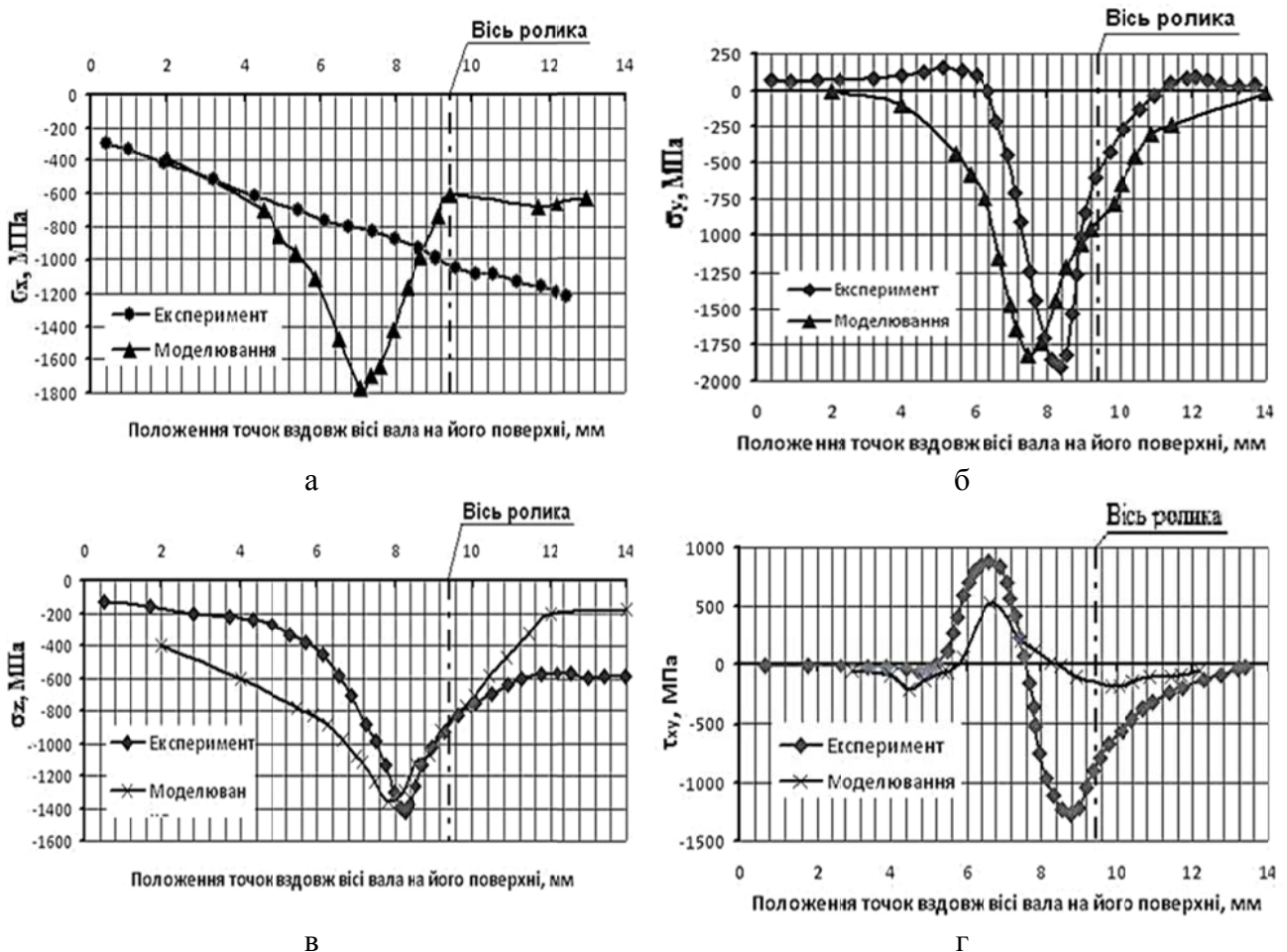


Рис. 2. Залежність σ_x (а), σ_y (б), σ_z (в) і τ_{xy} (г) від положення точок вздовж вісі валу по поверхні, що деформується

Враховуючи вищесказане, дані, отримані в програмі Deform 3D, можуть використовуватись для попереднього аналізу цього процесу при подальшому його експериментальному дослідженні.

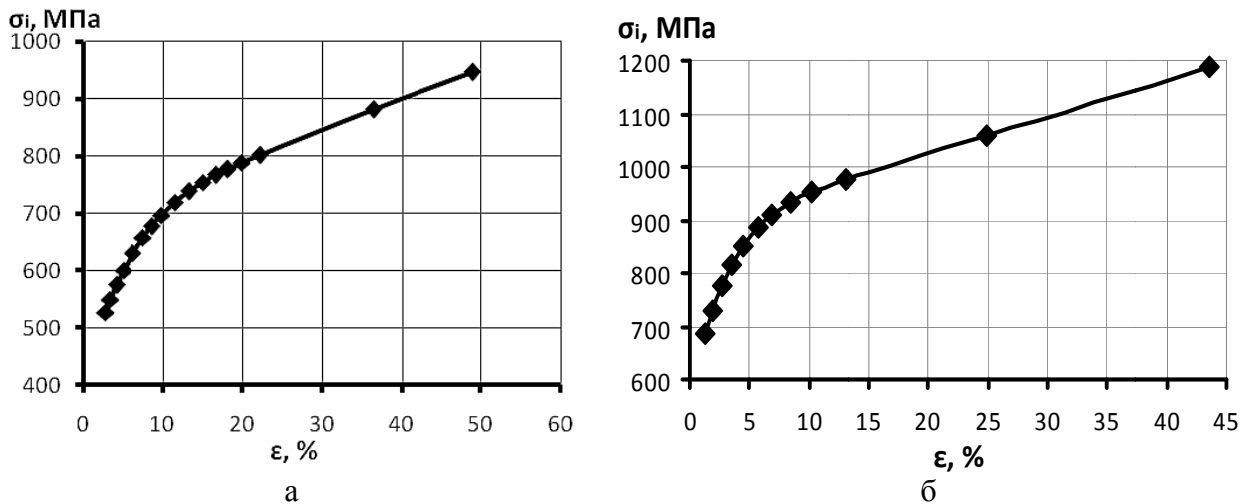


Рис. 3. Криві зміцнення сталей 45:

а – твердістю НВ 180 (після нормалізації); б – після відпуску при 540 °С

Моделювання ППД кулькою. Вивчаючи процес ППД кулькою, проведено декілька моделювань обкочування кулькою циліндричної заготовки із сталі 45 з твердістю 286...293 НВ, крива зміцнення $\sigma_I - \varepsilon_I$ якої показана на рис. 3, б [5], щоб встановити, як змінюється твердість заготовки від глибини в залежності від швидкості обертання заготовки ω_3 , кількості проходів кульки k , зусилля тиску кульки F на заготовку та її діаметра D_K . Схема процесу (а) обкочування та сформована модель (б) цього процесу в програмі Deform 3D показані на рис. 4. Циліндрична заготовка з зовнішнім діаметром 40 мм, шириною 7 мм обкочувалась кулькою в декілька проходів.

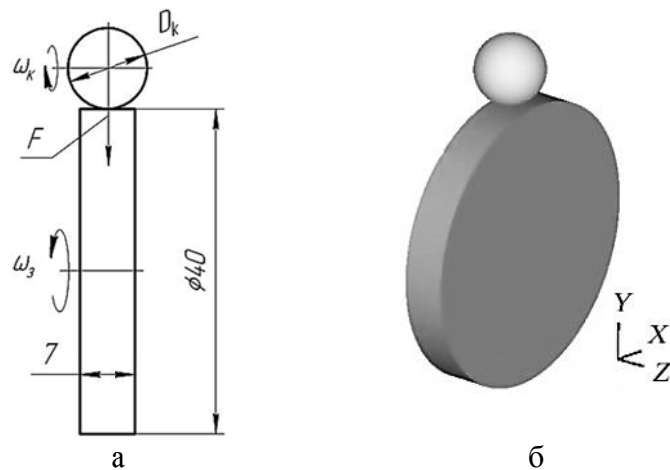


Рис. 4. Схема (а) та модель (б) процесу обкочування кулькою

Заготовка задавалась як пружно-пластичне тіло та була поділена на сітку тетраедричних скінчених елементів з мінімальними розмірами 1 мм та максимальними 2 мм. Для більш точного розрахунку в області деформування сітка була подрібнена на тетраедричні елементи з розмірами 0,3 мм. Кулька була задана як абсолютно жорстке тіло. Коефіцієнт тертя був встановлений $-0,1$. Під час моделювання кулька поступово вдавлювалась в заготовку і за певний час тиск на поверхню заготовки досягав необхідної заданої величини.

Проведено декілька моделювань ППД кулькою різними діаметрами кульок $D_{K1} = 10$ мм та $D_{K2} = 5$ мм; з різним числом обертів заготовки $n_{31} = 95,5$ об/хв, $n_{32} = 63,7$ об/хв та $n_{33} = 31,59$ об/хв з різними зусиллями тиску кульки на заготовку $F_1 = 1600$ Н та $F_2 = 2400$ Н;

з різною кількістю проходів $k = 1 \div 5$. Після кожного випадку моделювання ППД кулькою було отримано розподіл інтенсивності напружень в процесі деформування поверхні циліндричної заготовки.

Користуючись підходом [6], який оснований на допущенні, що інтенсивність напружень σ_I зв'язана з твердістю по Вікерсу HV залежністю:

$$\sigma_I = K \cdot HV, \quad (1)$$

можливо знайти розподіл твердості в оброблюваному тілі при умові, що для сталі 45 $K = 0,32$.

Використовуючи формулу (1), можна визначити в першому наближенні через інтенсивність напружень твердість в області деформування. Побудовано графіки залежності твердості HV від глибини вимірювання h :

– при використанні кульок з різними діаметрами ($D_{K1} = 10$ мм та $D_{K2} = 5$ мм) з незмінними: кількістю обертів заготовки $n_{31} = 95,5$ об/хв, зусилля тиску кульок на заготовку $F_1 = 1600$ Н та одному проході кульок (рис. 5);

– при різних зусиллях тиску ($F_1 = 1600$ Н та $F_2 = 2400$ Н) з незмінними: кількістю обертів заготовки $n_{31} = 95,5$ об/хв, діаметру кульки $D_{K1} = 10$ мм та п'ятьма проходами кульки (рис. 6);

– при різних проходах ($k = 1 \div 5$) кульки з незмінними: кількістю обертів заготовки $n_{31} = 95,5$ об/хв, діаметру кульки $D_{K1} = 10$ мм та зусилля тиску кульки на заготовку $F_1 = 1600$ Н (рис. 7);

– при різних кількостях обертів заготовки ($n_{31} = 95,5$ об/хв, $n_{32} = 63,7$ об/хв та $n_{33} = 31,59$ об/хв) з незмінними: зусилля тиску кульки на заготовку $F_1 = 1600$ Н, діаметру кульки $D_{K1} = 10$ мм та п'ятьма проходами кульки (рис. 8).

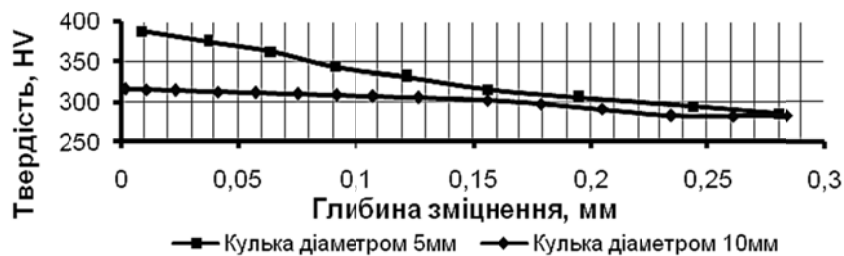


Рис. 5. Зміна твердості по глибині поверхневого шару в залежності від діаметра кульки

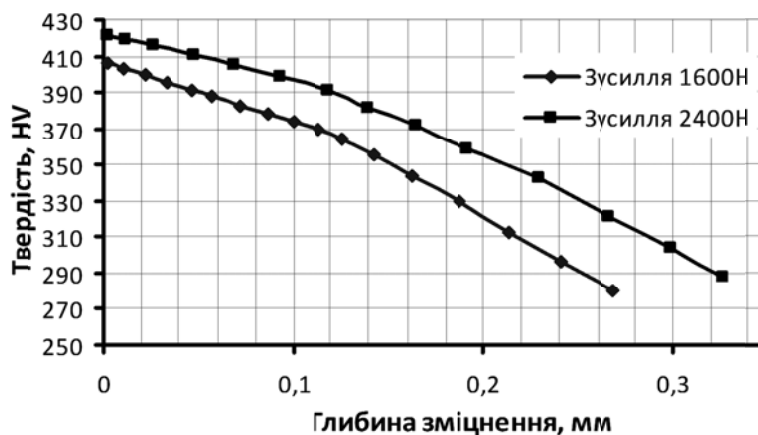


Рис. 6. Зміна твердості по глибині поверхневого шару в залежності від зусилля тиску кульки

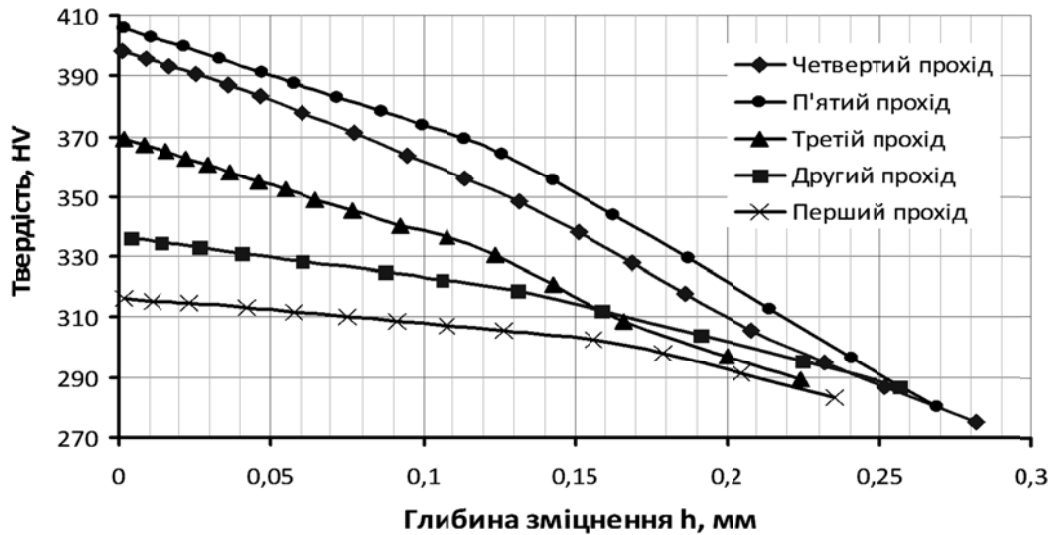


Рис. 7. Зміна твердості по глибині поверхневого шару в залежності від кількості проходів

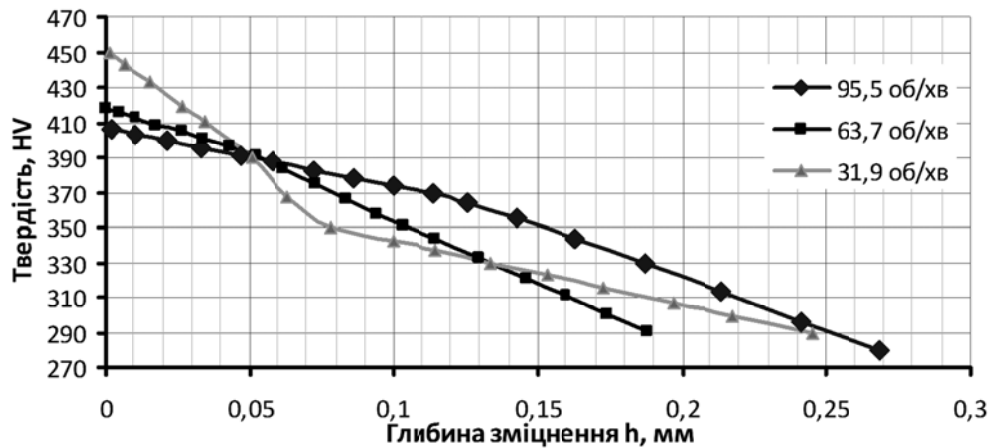


Рис. 8. Зміна твердості по глибині поверхневого шару в залежності від кількості обертів вала за хвилину

Моделювання ППД кулькою показало можливість оцінки впливу параметрів процесу на формування зміцненого поверхневого шару. Підхід дозволяє вибрати оптимальний технологічний процес ППД до проведення експериментальних досліджень. Він дає можливість порівнювати результати моделювання МСЕ та експериментів з обкочування, в яких вимірюється розподіл твердості по Вікерсу (НВ) в поверхневому шарі. Як приклад, порівняємо результати моделювання та експериментальних досліджень, проведених різними авторами [7, 8].

В роботі [7] розглядається обкочування сталі 45 при різній кількості проходів та різних швидкостях обробки поверхні заготовки, в роботі [8] – обкочування роликом $\varnothing 50$ мм з радіусом його округлення $\varnothing 10$ мм заготовки із сталі X5CrNiMo17-12-2. На рис. 9 показано порівняння одержаних результатів моделювання та експерименту [7, 8] з визначення впливу кількості проходів на поверхню твердість заготовки після обкочування. З графіків видно, що зміна твердості від кількості проходів, що одержана в моделюванні, схожа на ту, яка отримана в ході експерименту [7, 8].

Крім цього в роботі досліджувався вплив швидкості обробки на твердість поверхневого шару. На рис. 10 показані графіки зміни твердості на поверхні заготовки в залежності від швидкості обробки по результатам моделювання (а) та експерименту (б), що проводився в роботі [8], які змінюються майже прямолінійно. При чому зменшення кількості обертів заготовки приводить до збільшення її твердості.

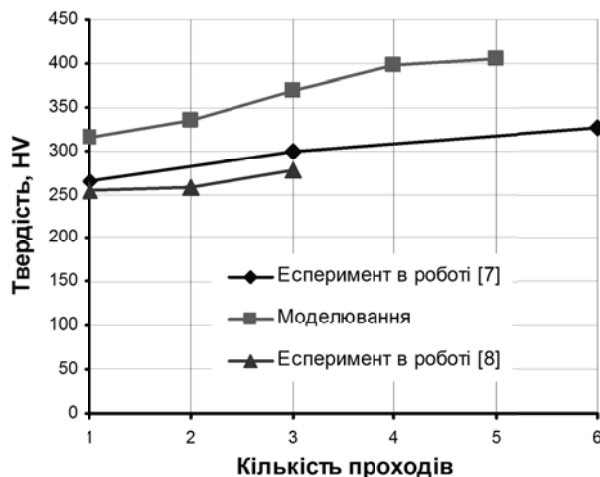
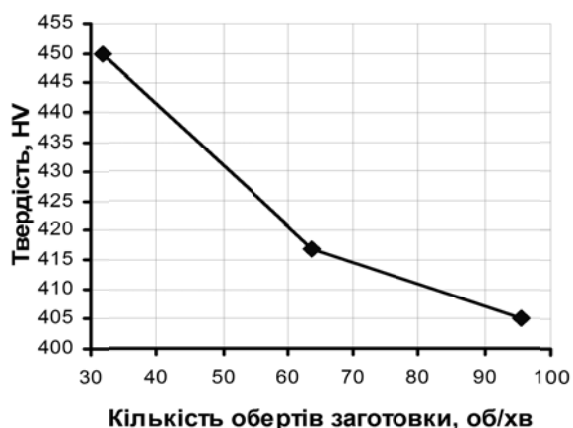
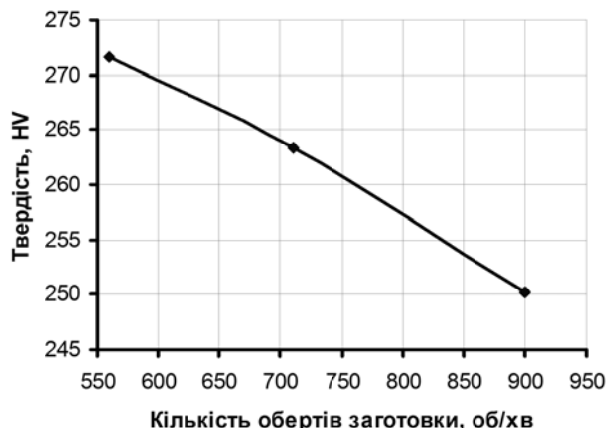


Рис. 9. Результати моделювання та експерименту [7, 8] по впливу кількості проходів на поверхневу твердість

В роботі [4] проведено експериментальне обкочування заготовки із загартованої сталі 45 твердістю HV 414...420 кулькою Ø10 мм, що тиснула на заготовку з зусиллям 1,6 кН за 4 переходи. В результаті чого твердість поверхні (рис.11) заготовки зросла в 1,25 рази (на 100 HV). У той же час результати моделювання поверхневого зміцнення заготовки (див. рис. 7) аналогічного матеріалу з початковою твердістю 286...293 HV показали ріст твердості поверхні в 1,36 разів (на 110 HV).



а



б

Рис. 10. Зміна твердості на поверхні заготовки в залежності від швидкості обробки по результатам моделювання (а) та експерименту (б)

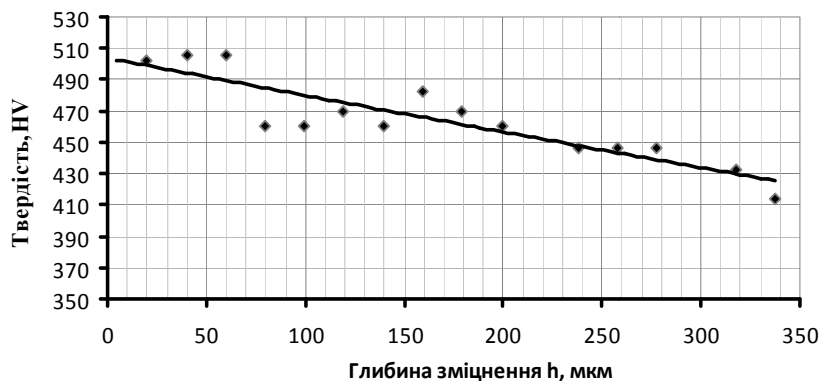


Рис. 11. Розподіл твердості в поверхневому шарі по результатам експерименту

Отже, використовуючи результати моделювання, можна вибрати оптимальний технологічний процес ППД до проведення експериментальних досліджень.

ВИСНОВКИ

Порівнюючи напруження, отримані в експерименті та в моделюванні, встановлено, що форми графіків залежностей цих напружень від положення точок вздовж вісі вала по поверхні схожі. Значна різниця між формою графіків на рис. 2, а може бути викликана помилкою розрахунків в роботі [1]. Координати екстремумів на цих графіках різні через те, що в роботі [1] не вказані всі характеристики процесу ППД. Тому дані отримані в процесі моделювання ППД в програмі Deform 3D потрібно порівнювати з результатами інших експериментальних робіт.

Проведено порівняння результатів моделювання з експериментами, які були виконані різними авторами. Встановлено, що результати моделювання добре погоджуються з даними, наведеними в експериментах, але порівняння ускладнюються відсутністю кривих зміцнення матеріалів в дослідях, що впливає на точність моделювання МСЕ подібних процесів.

Встановлено в моделюванні та експериментах, що збільшення зусилля обкочування (при моделюванні з 1,6 кН до 2,4 кН) підвищує твердість поверхневого шару деталі, а також розширює об'єм зміцненого шару. Зменшення кількості обертів заготовки та діаметра кульки приводить до збільшення твердості на поверхні вала.

В процесі ППД доцільно використовувати максимум 4–5 проходів, при яких твердість поверхні деталі досягає найбільшого значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смелянский В. М. Исчерпание запаса пластичности металла в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием / В. М. Смелянский, Ю. Г. Калтин, В. В. Бариков // *Вестник машиностроения*. – 1990. – № 8. – С. 54–58.
2. Бутаков Б. И. Влияние поверхностной пластической деформации на степень упрочнения и диффузию химических элементов в поверхностном слое / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // *Вестник ХНАДУ*. – 2009. – № 46. – С. 17–21.
3. Алиев И. С. Исследование влияния поверхностного пластического деформирования на состояние поверхностного слоя и служебные характеристики изделий / И. С. Алиев, В. А. Матвийчук // *Вісник Київського політехн. ін-та машинобудування*. – 2008. – № 54. – С. 13–20.
4. Маковей В. О. Формування та дослідження комбінованих покриттів на різьблених кромках штампів та на деталях машин / В. О. Маковей, Ю. П. Бородій, В. С. Курихін // *Вісник Київського політехн. ін-та машинобудування*. – 2009. – № 55. – С. 256–264.
5. Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1968. – 131 с.
6. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
7. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
8. Tomasz Dyl The burnishing strengthen shafts neck of centrifugal pumps / Dyl Tomasz // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. – 2011. – Vol. 8. – № 2. – С. 123–128.

Маковей В. О. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;

Бородій Ю. П. – асистент НТУУ «КПІ»;

Проценко П. Ю. – аспірант НТУУ «КПІ»;

Акімкін А. М. – студент НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: pavel07@i.ua