

УДК 621.787.4

В.О. Федорович, д-р техн. наук, І.М. Пижов, д-р техн. наук,
Н.В. Рязанова-Хитровська, магістр, Л.В. Богданов, магістр,
Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

Стаття присвячена 3D моделюванню напружено-деформованого стану процесу алмазного вигладжування при використанні додаткового впливу механічних коливань (вібрацій). Виконані дослідження по встановленню раціональних режимів обробки для вказаного комбінованого процесу вигладжування. З використанням методу багатфакторного планування експерименту типу В4 встановлена математична модель процесу.

Ключові слова: напружено-деформований стан, процес алмазного вигладжування, 3D моделювання

Статья посвящена 3D моделированию напряженно-деформированного состояния процесса алмазного выглаживания при использовании дополнительного воздействия механических колебаний (вибраций). Выполнены исследования по установлению рациональных режимов обработки для указанного комбинированного процесса выглаживания. С использованием метода многофакторного планирования эксперимента типа В4 установлена математическая модель процесса.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, процесс алмазного выглаживания, 3D моделирование

The article is devoted to 3D modeling of the stress-strain state of the diamond smoothing process with the use of additional influence of mechanical vibrations. The research was carried out to establish rational treatment regimes for the specified combined smoothing process. Using the method of multi-factor planning of an experiment of type В4, a mathematical model of the process is established.

Keywords: stress-strain state, diamond smoothing process, 3D modeling

1. Постановка проблеми. Комбіновані процеси обробки в багатьох випадках дозволяють суттєво підвищити ефективність обробки деталей з різноманітних матеріалів. Це підтверджено результатами досліджень, проведених рядом вчених, які продемонстрували, що застосування, наприклад, ультразвукового поля у вигляді коливань при механічній обробці матеріалів призводить до зменшення опору металу деформації, а отже і до зниження діючих зусиль, що в свою чергу дозволяє інтенсифікувати технологічний процес обробки, поліпшити точність і якість виробів [1, 2, 3]. Ефективність таких процесів доказана при обробці не тільки пластичних, а й крихких матеріалів, наприклад, надтвердих [4], а також стосовно правки абразивних кругів алмазними олівцями [5].

Одним з методів обробки, в якому відносно легко можна реалізувати підвід в зону обробки енергії механічних коливань, є алмазне вигладжування.

Але розширення сфери застосування даного виду обробки обмежена відсутністю комплексних досліджень по впливу ультразвуку на цей процес.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні дослідження показали, що використання додаткового ультразвукового навантаження при вигладжуванні покращує умови взаємодії інструменту з поверхнею оброблювального матеріалу (ОМ) в першу чергу за рахунок зменшення сил тертя [3]. При цьому фактура поверхні має сформований однорідний мікрорельєф як в поздовжньому так і в поперечному напрямках.

Стан оброблювальної поверхні деталі багато в чому залежить від умов обробки [6]. Вони, як відомо, значною мірою впливають на рівень еквівалентних напруг в зоні контакту інструмента з деталлю [7]. Сучасним методом їх дослідження в наш час вважається 3D моделювання напружено-деформованого стану (НДС) зони обробки [7, 8, 9]. Практична реалізація верстаних експериментів щодо ультразвукового алмазного вигладжування є дорогим і трудомістким процесом. Тому актуальним альтернативним методом його дослідження можна вважати раціональне поєднання «обчислювального» і верстатного експериментів.

Одним з можливих варіантів САД-систем для вирішення поставлених завдань по моделюванню вібраційного алмазного вигладжування є пакет SolidWorks, що містить плагін Simulation, який базується на методі скінчених елементів (МСЕ).

3. Мета дослідження. Визначення впливу ультразвукових коливань, що накладаються на інструмент при вигладжуванні, на НДС в зоні контакту алмазного вигладжувача з ОМ.

4. Матеріали дослідження. Оскільки в якості параметру, що підлягає дослідженню, був обраний рівень еквівалентних напруг у зоні обробки, на початку досліджень була побудована вихідна 3D-модель системи «корпус вигладжувача – припій – металеве покриття – алмаз – металофаза – оброблювальний матеріал», яка в програмному пакеті була триангульована та навантажена (рис. 1).

В ході експерименту модель навантажували силами Q_1 (прикладена до алмазного вигладжувача) та зусиллям подачі Q_2 (прикладене до бічної грані).

Моделювання вібраційного вигладжування проводилося шляхом варіювання зусилля притиску інструменту до деталі з часом. Для цього зусилля притиску задавалося як гармонійне навантаження, графік якого створювався заздалегідь у вигляді синусоїди (рис. 2) з амплітудою рівною прикладеному навантаженню.

Для встановлення математичної моделі процесу вібраційного вигладжування був реалізований план типа В4. За фактори були прийняті: модуль пружності матеріалу припою ($\mu_{\text{пр}}=0,91\text{E}+11 - 1,05\text{E}+11 \text{ Н/м}^2$), частота ($f=10 - 50 \text{ кГц}$) механічних коливань вигладжувача, радіус робочої частини вигладжувача ($r_{\text{в}}=1 - 3 \text{ мм}$) і модуль пружності ОМ ($\mu_{\text{ОМ}}=1,9\text{E}+11 - 6,9\text{E}+11 \text{ Н/м}^2$).

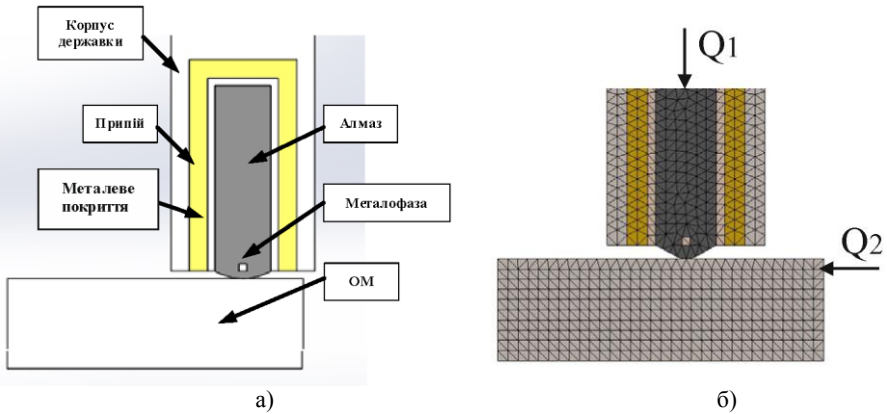


Рисунок 1 – До моделювання процесу вібраційного алмазного вигладжування
 а) – модель системи; б) – схема навантаження скінченоелементної моделі

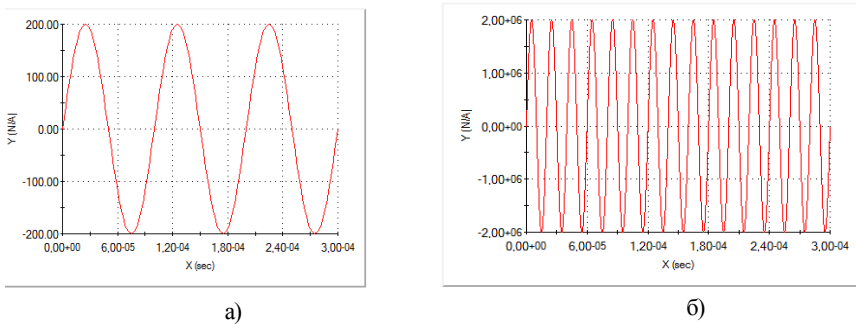


Рисунок 2 - Графік гармонійного навантаження (амплітуда 2 МПа):
 а) – частота коливань 10 кГц; б) – частота 50 кГц.

Візуалізація результатів моделювання по впливу обраних факторів на НДС зони обробки при накладенні вібрацій (за планом В4) наведена на рис. 3.

Математична обробка даних за результатами модельних експериментів дозволила встановити математичну модель, яка описує зв'язок критерію оптимізації (еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$) з обраними факторами:

$$Y = 2,484 + 0,134X_1 + 0,244X_2 + 0,327X_3 + 0,463X_4 + 0,805(X_1)^2 + 0,366(X_2)^2 - 0,412(X_3)^2 - 0,291(X_4)^2 - 0,014X_1X_2 + 0,001X_1X_3 - 0,014X_1X_4 + 0,016X_2X_3 - 0,014X_2X_4 + 0,045X_3X_4$$

Графіки залежності $\sigma_{\text{екв}}$ від частоти вібраційних коливань при різних модулях пружності ОМ показали, що при таких коливаннях раціональніше використовувати звичайні сталі із мінімальним модулем пружності (рис. 4, 5).

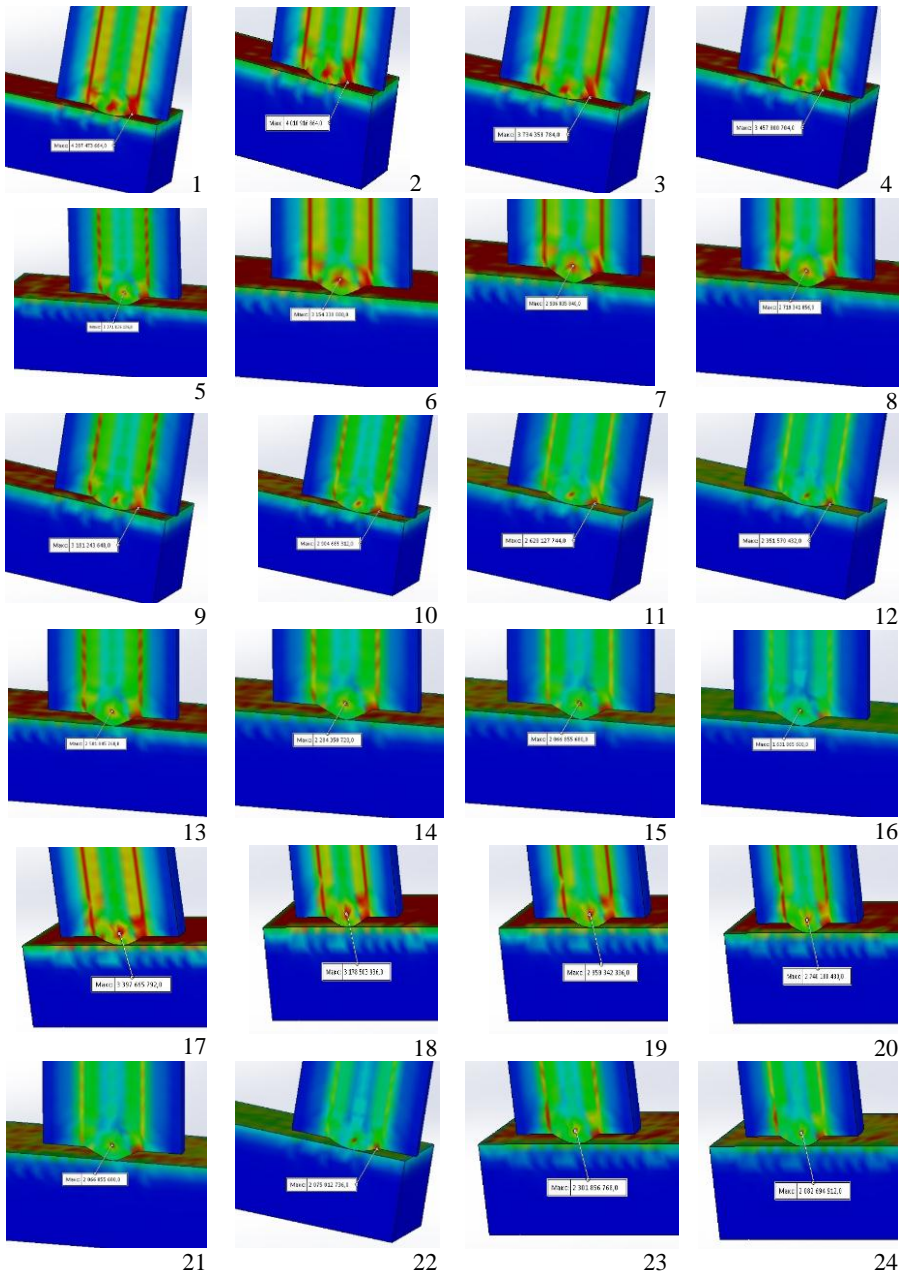


Рисунок 3 – Візуалізація результатів моделювання

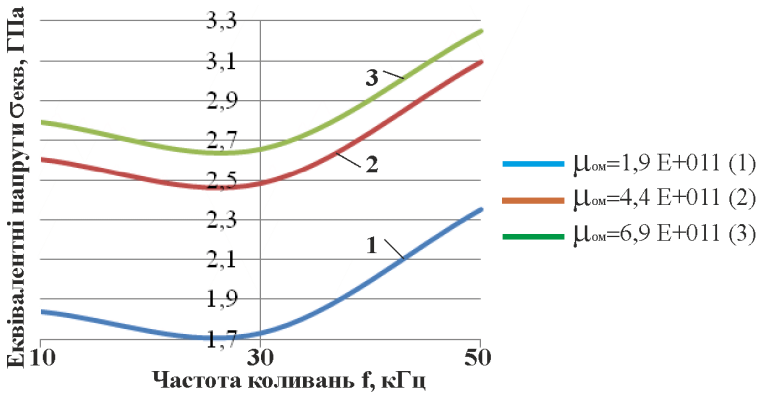


Рисунок 4 – Залежність $\sigma_{екв}$ від частоти коливань та модулю пружності припою

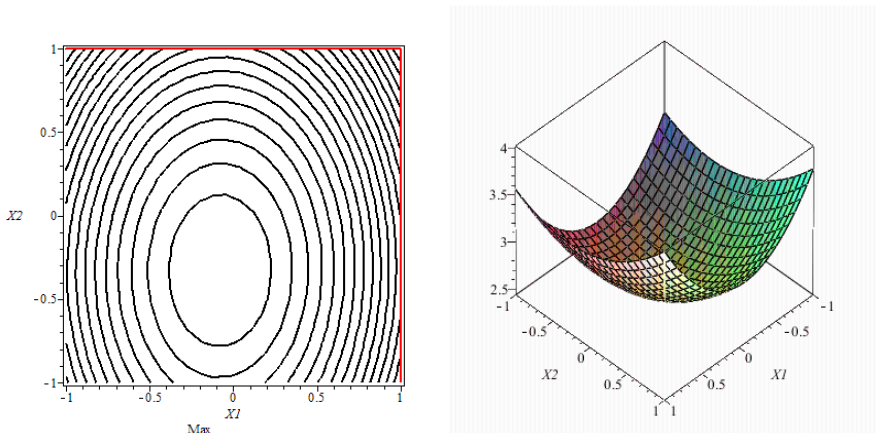


Рисунок 5 – Візуалізація оптимальних напружень від частоти коливань ($X2$) і модуля пружності припою ($X1$)

Цей ефект можна пояснити тим, що коливання поширюються в будь-якому середовищі і пружні хвилі поглинаються. Це обумовлено в'язкістю (силами внутрішнього тертя), теплопровідністю, а на високих частотах і молекулярним поглинанням в середовищі [5].

При цьому енергія звукових хвиль переходить в теплову енергію. Крім поглинання спостерігається розсіювання звукової енергії на пружних неоднорідностях в середовищі, при цьому розсіювання звуку істотно зростає при розмірах неоднорідностей, порівнянних з довжиною звукової хвилі.

Наявність рівняння регресії стосовно процесу вібраційного вигладжування дозволяє отримати уявлення про поверхні відгуку і дає можливість виявити можливі екстремуми в програмному пакеті Maple 14.

Візуалізація оптимального значення напруг наведена на рис. 5. Оптимізація процесу алмазного ультразвукового вигладжування проведена в програмному пакеті Maple 14 дозволила встановити оптимальні значення факторів при яких максимальні еквівалентні напруги становить $Y_{\max} \approx 4,3$ ГПа ($X_1 = -0,094$; $X_2 = -0,332$; $X_3 = -1$; $X_4 = -1$).

Після переведення закодованих значень в натуральні маємо, що їх оптимальні величини наступні: $\mu_{\text{пр}} \approx 0,98E+11$ Н/м²; $f \approx 29,3$ кГц; $r = 1$ мм; $\mu_{\text{ом}} = 6,9E+011$ Н/м².

При моделюванні вібраційного вигладжування додатково встановлено, що напруги рівномірно розподіляються уздовж всього алмазу, що в свою чергу покращує його утримання в припої. При вигладжуванні без вібраційних коливань, максимальне навантаження концентрується в металофазі алмазного зерна. Це може привести до руйнування зерна і його подальшого випадіння з корпусу державки.

Висновки та перспективи розвитку. Сумісне застосування 3D моделювання напружено-деформованого стану системи вигладжування та методу планування модельних експериментів дозволяє прогнозувати оптимальні параметри процесу і вже на стадії проектування отримати дані по раціональним умовам обробки, що значно зменшує час на подальші експериментальні (верстатні) дослідження процесу алмазного вигладжування.

Список використаних джерел. 1. Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. 2. Овсеенко А.Н. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. - М.: Янус-К, 2003. - 296 с. 3. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с. 4. Федорович В.А. 3D Моделирование вибрационного алмазного шлифования / В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, С.С. Кронов. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2013.- Вып. 83. -С. 269-276. 5. Киселев Е. С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ / Е. С. Киселев. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 171 с. 6. Титов А. В. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-23 с использованием твердой смазки / А. В. Титов, Т. М. Лабур, А. Л. Пузырев // Вестник НТУУ «КПИ», серия «Машиностроение». – 2008. – № 53. – С. 202–207. 7. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 8. Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов// А.В. Титов, Л.В. Шмелёва,

Е.А. Кириенко, О.В. Герасимова //Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. –№ 2 (41). –с.81-86. **9.** Рязанова-Хитровская Н.В. Исследование напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании / Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2013.- Вып. 86. –С. 151-159.

Bibliography (transliterated): **1.** Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. **2.** Ovseenko A.N. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva izdelij mashinostroenija: monografija / A.N. Ovseenko, V.I. Serebrjakov, M.M. Gaek. - M.: Janus-K, 2003. - 296 s. **3.** Kumabje D. Vibracionnoe rezanie. Per. s jap. S. L. Maslennikova / Pod red. I. I. Portnova, V. V. Belova. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 424 s. **4.** Fedorovich V.A. 3D Modelirovanie vibracionnogo almaznogo shlifovanija / V.A. Fedorovich, I.N. Pyzhov, S.S. Kronov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.–Har'kov: 2013.- Vyp. 83. -S. 269-276. **5.** Kiselev E.S. Teplofizika pravki shlifoval'nyh krugov s primeneniem SOZh / E. S. Kiselev. Ul'janovsk: UIGTU, 2001. 171 s. **6.** Titov A. V. Osobennosti almaznogo vyglazhivaniya splava VT-23 s ispol'zovaniem tverdogo smazki / A. V. Titov, T. M. Labur, A. L. Puzyrev // Vestnik NTUU «KPI», serija «Mashinostroenie». – 2008. – № 53. – S. 202–207. **7.** Grabchenko A. I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija: Ucheb. posobie / A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich. – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364 s. **8.** Modelirovanie povtornoj operacii vyglazhivaniya metodom konechnyh jelementov// A.V. Titov, L.V. Shmeljova, E.A. Kirienko, O.V. Gerasimova // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2015. –№ 2 (41). – s.81-86. **9.** Rjazanova-Hitrovskaja N.V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija zony obrabotki pri almaznom vyglazhivanii / N.V. Rjazanova-Hitrovskaja, I.N. Pyzhov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.–Har'kov: 2013.- Vyp. 86. -S. 151-159.

Поступила в редколлегию 25.06.2018