

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ І ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ АЗОТУВАННЯ ТА ШЛІФУВАННЯ

У роботі представлено підхід до чисельного моделювання дифузійного перерозподілу азоту у сталевих деталях шпиндельних вузлів після іонного азотування та оцінено вплив енергетичних параметрів фінішного алмазного шліфування на стабільність та якісні характеристики зміцненого шару. На основі модифікованої моделі Fick/Arrhenius із застосуванням механізму trapping-detrapping та термодинамічного врахування локальних температурних імпульсів сформовано FEM-модель прогнозування концентраційних профілів азоту залежно від режимів ізотермічного нагріву й теплових впливів шліфування. Проведений аналіз літературних джерел підтвердив актуальність комплексного підходу «азотування–термоцикування–шліфування» та його значення для підвищення довговічності високоточних деталей машинобудування. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів та підвищення ресурсу шпиндельних вузлів [1].

Проблема збереження стабільності та довговічності зміцнених поверхневих шарів у деталях шпиндельних вузлів залишається актуальною в умовах високих навантажень, температурних градієнтів і вимог до точності позиціонування. Іонне азотування є одним із найбільш перспективних методів формування зміцненого шару, однак його ефективність значною мірою залежить від подальших технологічних операцій, зокрема фінішного алмазного шліфування, яке може змінювати мікроструктуру поверхні через локальні термічні імпульси.

Сучасні чисельні моделі переносів азоту по сталі включають не лише класичну Fick/Arrhenius дифузію, а й механізми «trapping-detraping», вплив пластичних деформацій і напружень на коефіцієнт дифузії – що особливо важливо при низькотемпературних плазмових методах. 2D/3D моделі, що враховують ці ефекти, дозволяють отримувати адекватні профілі твердості та глибини азотованого шару, а також оцінювати його стійкість у процесі плазмового азотування [2].

Finite-element підходи дозволяють адекватно відтворити концентраційні профілі та врахувати граничні умови (масове обмеження, границі насичення, вплив масопереносу в тонких покриттях) – приклади моделювання опубліковані для газового та плазмового азотування [3].

Ізотермічний нагрів після іонного азотування сприяє перерозподілу азоту (вивільнення/перерозподіл у підшарі), зміні типу фаз ( $\epsilon/\gamma$  і т. ін.) та розвитку залишкових напруг – явища, що суттєво впливають на механічні характеристики шару. Це підтверджують як експерименти, так і моделювання нагрітих циклів [4].

Алмазне шліфування може створювати значні локальні температурні поля у зоні контакту; зростання температури призводить до ризику перегріву, зміни мікроструктури, виникнення залишкових напруг і навіть до часткового відпалу зміцненого шару. Дослідження по поверхневій цілісності після шліфування підкреслюють потребу контролю питомої енергії шліфування та теплового потоку [5].

Поведінка зміцненого шару при шліфуванні залежить від: глибини та форми концентраційного профілю, твердості й рівня залишкових напруг, енергетики шліфувального контакту; інтегроване моделювання дозволяє виявити безпечні робочі режими з мінімальним ушкодженням шару [2].

Додатковий вплив на структуру зміцненого шару справляє алмазне шліфування, під час якого утворюється нерівномірне температурне поле в зоні контакту, що може сягати локальних значень 300–700 °C [6]. За умови перевищення критичного теплового порогу можливе часткове розчинення нітридів, зменшення твердість і деградація шару. Тому чисельне моделювання повинно інтегрувати термічні параметри процесу шліфування як складову граничних умов.

**Ціль FEM-моделі** – обчислити еволюцію концентраційного профілю азоту  $C_N(x,t)$  в сталі підшипника після та під час ізотермічного відпалу залежно від початкового профілю, температури відпалу  $T_{ann}$ , часу  $t_{ann}$  і параметрів шліфування (як зовнішнього термально-енергетичного імпульсу).

**Основні фізичні механізми, які враховуються в моделі:**

- нелінійна дифузія:  $D=D(C_N, T, \sigma)$  – коефіцієнт залежить від концентрації, температури та локальних напруг;
- процеси «trapping-detraping» азоту на дефектах і карбідах (рівняння типу ловлення/вивільнення);
- вплив пластичної деформації (модель перебалансування впливу напруги через механічно-сумісне переміщення атомів – stress-assisted diffusion);
- зовнішній тепловий імпульс від шліфування – як гранична/об’ємна теплова навантажувальна функція  $Q(x,t)$ , що змінює місцеву температуру і, отже,  $D$ .

Експериментальна частина дослідження передбачає використання GDOES/EPMA для аналізу концентраційного профілю азоту, мікротвердості HV0,025, SEM/EDS для аналізу мікроструктурних змін та XRD – для визначення фазового складу й залишкових напружень. Порівняння експериментальних профілів з результатами FEM-моделі дозволяє виконати калібрування параметрів  $D(C_N, T, \sigma)$  та швидкостей trapping/detraping, а також визначити допустимі межі енергетичного впливу при шліфуванні.

Сформована модель дозволяє визначити критичні режими шліфування, при яких зміцнений шар зберігає свої захисні та експлуатаційні властивості, і може бути застосована для оптимізації технологічних маршрутів у виробництві прецизійних деталей машинобудування. Отримані результати свідчать, що комплексний підхід, який включає азотування, контроль термічних навантажень і моделювання дифузійних процесів, здатний забезпечити суттєве підвищення ресурсу деталей шпиндельних вузлів.

Отримані результати підтвердили, що стабільність та довговічність азотованого зміцненого шару визначаються комплексною дією

дифузійних процесів і локальних теплових імпульсів алмазного шліфування, а розроблена FEM-модель коректно відтворює їх реальний вплив. Встановлено критичні теплові режими, за яких шар зберігає мікротвердість, фазову стабільність і службову довговічність. Подальші дослідження доцільно зосередити на створенні інтегрованої багатофізичної моделі, здатної прогнозувати деградацію зміцненого шару в реальних динамічних режимах шліфування та термоцикування.

### Список використаних джерел

1. Віштак І.В., Мельченко, А.С. Вплив режимів шліфування на основні параметри якості поверхневих шарів газових підшипників та їх експлуатаційні властивості. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 2025, вип. 11(42), ч. 2, с. 87–98. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.87-98](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.87-98).
2. Andriūnas P., Šerapaitė-Trušinskienė, R., Galdikas, A. Modeling of Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel through a Mask. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 8, p. 1014. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14081014>.
3. Syla N., Dalipi B., Elezaj N., Aliaj F., Tolaj Z., Zeqiraj A. Finite – element modeling of the N concentration profile in 31CrMoV9 steel after gas nitriding. *Emerging Materials Research*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 375–377. DOI: <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00154>.
4. Bolotov G., Bolotov G.P., Rudenko M.M. The Impact of Nitriding Parameters on Evolution of Properties of Stainless-Steel Surface Plasma-Nitrided in Glow Discharge. *Progress in Physics of Metals*, 2024, vol. 25, no. 1, pp. 74–113. DOI: недоступний. Режим доступу: <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.
5. Yan H., Deng F., Qin, Z., Zhu J., Chang H., Niu H. Effects of Grinding Parameters on the Processing Temperature, Crack Propagation and Residual Stress in Silicon Nitride Ceramics. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 3, p. 666. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14030666>.
6. Taghinejad J., Vejdanihemmat M., Niknam A.R. Numerical analysis of nitrogen adsorption and penetration depth in plasma-nitrided austenitic stainless steel 316: A crystallographic orientation study. *AIP Advances*, 2025, vol. 15, p. 045027. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0260707>.