



Матвійчук В. А.
д.т.н., професор

Гайдамак О. Л.
к.т.н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет*

Matviychuk V.
Gaidamak O.

*Vinnitsia National Agrarian
University*

УДК 621.735.34; 621.793.79
DOI: 10.37128/2306-8744-2020-3-2

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПРИ ПОВТОРНО-ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

В статті наведено результати розробки процесів з метою покращення експлуатаційних властивостей деталей, що працюють при повторно-змінних навантаженнях, з врахуванням обґрунтованих параметрів поверхневого пластичного деформування (ППД) та холодного газодинамічного напилення покриттів. Проаналізовано вплив на глибину робочого поверхневого шару, характер розподілення в ньому напружено-деформованого стану об'єму поверхневого шару матеріалу і залишкових напружень стиску, а також значень використаного ресурсу пластичності поверхневого шару матеріалу заготовки, параметрів технологічного процесу ППД. В статті показано, що головним фактором формування залишкових напружень стиску при ППД є зменшення щільності поверхневого шару заготовки, яке пов'язане з використанням ресурсу пластичності. Запропонована модель розрахунку використаного ресурсу пластичності матеріалу заготовки при ППД, яка дозволяє забезпечувати покращену якість поверхневого шару деталей. Запропоновано спосіб переміщення шарів заготовки з максимальним зміцненням і залишковими напруженнями стиску до поверхні деталі шляхом застосування деформівного інструменту зменшених розмірів на наступних проходах з нанесенням покриття на поверхню деталі газодинамічним напиленням перед проведенням ППД.

Холодне газодинамічне нанесення покриттів шляхом напилення, на відміну від більшості відомих газотермічних методів нанесення покриття які відбуваються при значних температурних впливах на поверхню деталі, що є недопустимим для поверхонь оброблених методами ППД, забезпечує допустимий температурний режим створення спеціальних допоміжних покриттів із збереженням властивостей поверхні, яка оброблена методами ППД.

Технологія газодинамічного нанесення покриттів шляхом напилення включає в себе нагрів стисненого газу (повітря), спрямування його в сопло і формування в цьому соплі надзвукового повітряно-порошкового потоку, напилювального матеріалу (мідь, алюміній), прискорення цього матеріалу до надзвукових швидкостей і направлення його на поверхню оброблюваного виробу. В результаті чого на поверхні виробу утворюється спеціальне допоміжне покриття (мідне або алюмінієве), яке забезпечує найкращі параметри процесу ППД.

Ключові слова: *холодне газодинамічне нанесення покриття, напилення, поверхнєве пластичне деформування, використаний ресурс пластичності, залишкові напруження стиску.*



Вступ. Інтенсифікація виробничих процесів призводить до вимушеного зростання швидкісного режиму обладнання та режимів з повторно-змінним навантаженням його деталей. В результаті надійність та довговічність машин значною мірою залежить від міцності на витривалість (опору втомі) найбільш навантажених вузлів та деталей. В свою чергу, витривалість деталей суттєво залежить від характеристик їх поверхневого шару. До таких характеристик належать: міцність (твердість) і пластичність матеріалу, наявність залишкових напружень стиску, мікроструктура матеріалу, шорсткість поверхні та її рельєф тощо. Одним із напрямів підвищення витривалості, а також інших експлуатаційних характеристик деталей є застосування методів поверхневого пластичного деформування (ППД).

В результаті застосування ППД в поверхневому шарі заготовки змінюються характеристики міцності і пластичності матеріалу, зростає твердість і залишкові напруження стиску, змінюється структура і текстура матеріалу. Однак цілеспрямовано впливати на ці зміни і прогнозувати необхідні якісні характеристики поверхневого шару не завжди є можливим через складність і не стаціонарність процесів ППД, а також недостатню їх вивченість. Тому впровадження процесів ППД для отримання необхідних характеристик виробу супроводжується трудомісткими експериментами. Причому їх результати поширюються, головним чином, лише на встановлення певних характеристик конкретних виробів із конкретного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження поверхневого шару показують, що всі способи поверхневої пластичної деформації створюють на поверхні залишкові напруження стиску, різні за величиною і глибиною розповсюдження, з переходом на глибині в залишкові напруження розтягу (рис. 1).

Результати втомних випробувань деталей після зміцнення методами ППД, як правило, показують на підвищення межі витривалості (рис. 2), але однозначного зв'язку з величиною і глибиною поширення залишкових напружень стиску не дають. Відповідно до рис. 2 залежності побудовані для видів обробки: 1 нормалізуюча термообробка; 2 – віброгалтовка стальними кульками діаметром 1,0-1,3 мм; 3 – ультразвукове зміцнення стальними кульками діаметром 1,0-1,3 мм; 4 – гідродробоструменеве зміцнення кульками діаметром 1,6 мм; 5 – дробоструменеве зміцнення стальними кульками діаметром 0,1-0,2 мм.

В роботі [2] приведені результати дослідження мало циклової втомлюваності гладеньких зразків на базі 8-10 цикл/хв, які свідчать, що всі методи ППД дають суттєве

підвищення довговічності, у порівнянні із шліфуванням.

При ППД формуються поверхні з досить малою шорсткістю і великим радіусом впадин та нерівностей, що також чинить сприятливий вплив на опір втомлюваності. Проте цей вплив завжди проявляється у сукупності з іншими параметрами якості поверхневого шару. Тому для деталей, що працюють під дією циклічних навантажень, відзначені раніше параметри мають більш суттєвий вплив на довговічність, ніж шорсткість. Пояснюється це тим, що впадини нерівностей мають вплив на опір втомі до тих пір, поки не виникає втомна тріщина. Крім того, після зміцнення ППД, втомна тріщина часто зароджується під поверхнею на певній глибині. А на період розвитку такої тріщини мають вплив саме деформаційні зміцнення і залишкові напруження стиску.

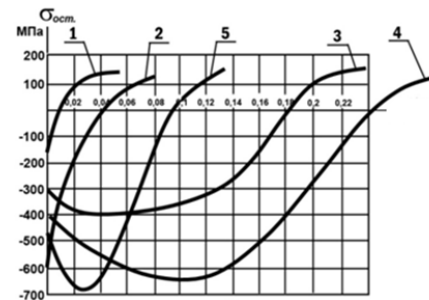


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень в поверхневому шарі деталей зі сплаву EP718 при різних видах фінішної обробки

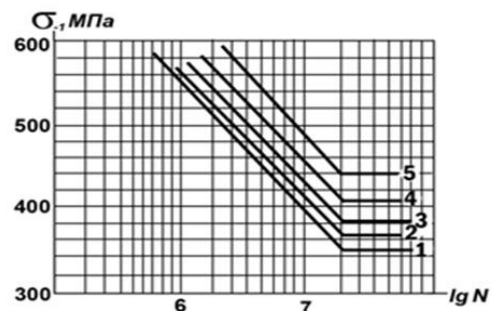


Рис. 2. Криві втомної міцності деталей із сплаву EP718 при різних видах фінішної обробки

При незначних степенях (3-10%) і глибині (10-20 мкм) зміцнення, відбувається зростання якісних характеристик матеріалу, що обумовлено зниженням об'ємних дефектів решітки, протіканням процесу полігонізації, формуванням сприятливої мікроструктури матеріалу. В той же час знижується залишкова пластичність матеріалу, підвищується чутливість до перевантажень і утворення тріщин.

Таким чином, найбільш узагальнюючими, для формування службових властивостей виробів, є характеристики міцності і пластичності



матеріалу, а також рівень залишкових напружень стиску в поверхневому шарі виробу, обробленого ППД. Особливо важливою є інформація про величину і характер розподілу в поверхневому шарі накопиченої деформації та залишкового ресурсу пластичності. Зазначені характеристики і визначають, значною мірою, службові характеристики виробу.

Проведений аналіз впливу ППД на опір втомі свідчить про те, що основними перешкодами у цілеспрямованій розробці процесів ППД є відсутність знань про характер розподілу напружено-деформованого стану матеріалу і його деформовності в зоні пластичного зміцнення.

Мета досліджень. Підвищення довговічності деталей, що працюють при повторно-змінних навантаженнях, шляхом розробки, на основі оцінки деформовності металів, обґрунтованих параметрів комбінованих технологічних процесів поверхневого пластичного деформування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження НДС пластичної зони при втискуванні в заготовку кульки було використано метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R -функцій. Характер розподілу ізоліній інтенсивності деформацій $\varepsilon_{ii} = \text{const}$ в зоні відбитку показаний на (рис. 3), отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. На рис. 4 приведена епюра залишкових напружень $\sigma_{ост}$ по глибині h

поверхневого шару деталі із сплаву ЕП718 після турбоабразивної обробки в суміші абразиву і сталевих кульок діаметром 0,1-0,2 мм.

Дослідження показали, що в результаті багатократного послідовного втискування інструменту, яке спостерігається при ППД, відбувається зміщення часток металу у різних напрямках, що приводить до зміни знаку компонент деформацій та напружень.

Показник напруженого стану $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень, змінюється від величин, що відповідають усесторонньому стиску ($\eta = -5 \dots -3$) на осі симетрії відбитку, до зсуву-розтягу ($\eta \geq 0$) на краю відбитку, в місці утворення пластичного валика. При втискуванні інструменту на ділянці між відбитками, показник η зростає через зменшення гідростатичного підпору зі сторони відбитків. В центрі заново утвореного відбитку він становить $\eta = -2 \dots -4$, а на його межі $\eta = 0 \dots 1$.

Таким чином, при ППД спостерігається складне багатоетапне деформування, яке супроводжується утворенням напливів на межі пластичних відбитків, з наступним їх втискуванням.

Як видно з рис. 3, характер деформованого стану в зоні відбитку є досить нерівномірним. Інтенсивність деформації поблизу поверхні становить лише 50-80% від максимальної. Найбільша деформація спостерігається в центрі відбитку на глибині $\approx 0.1d$ (від поверхні відбитку), де d – діаметр відбитку. Максимальна інтенсивність деформації в зоні відбитку приблизно становить

$\varepsilon_{ii}^{\max} \approx (0.4 \dots 0.5)d/D$, а глибина пластичної зони $h_{пл} = (1.4 \dots 1.6)d$, де d і D – діаметр відбитку і кульки відповідно.

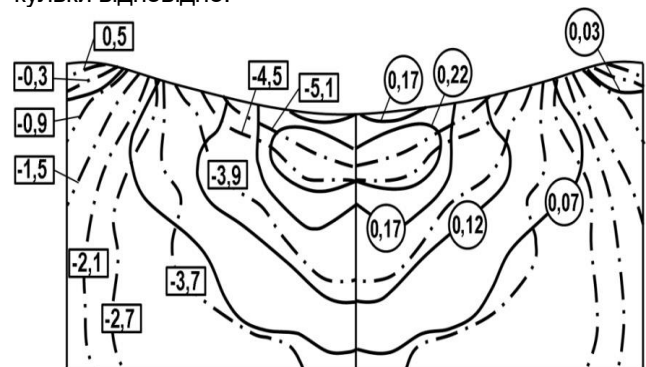


Рис. 3. Розподіл ізоліній інтенсивності деформацій $\varepsilon_{ii} = \text{const}$ (○) і показника $\eta = \text{const}$ (□) по глибині h зони пластичного відбитку

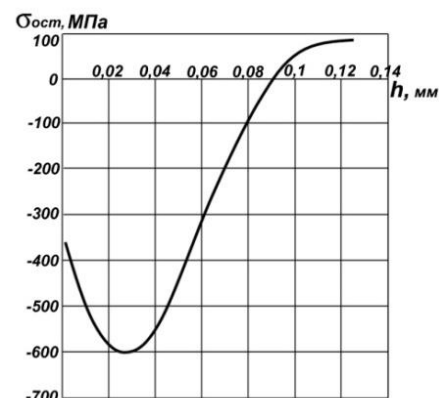
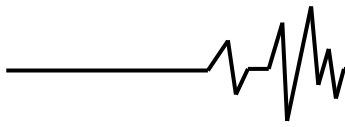


Рис. 4. Епюра залишкових напружень $\sigma_{ост}$ по глибині h поверхневого шару деталі із сплаву ЕП718 після турбоабразивної обробки

Таким чином, якщо необхідно сформувати тонкий сильно зміцнений шар, то слід застосовувати кульки малого діаметра, призначаючи багато перехідний процес з максимальною відносною глибиною відбитку. При



необхідності формування глибокого, помірно зміцненого шару, слід призначати мало перехідний процес ППД кульками відносно більших розмірів.

Відзначений характер розподілу деформованого стану по глибині поверхневого шару спостерігається і при багато перехідному деформуванні.

Інтенсивність напружень матеріалу поверхневого шару заготовки при ППД, а з урахуванням єдності кривої плинну, також і

інтенсивність деформацій, можна визначати шляхом вимірювання твердості (мікротвердості). Підвищення твердості пов'язане із дробленням кристалів на фрагменти і блоки, викривленням кристалічної решітки на їх границях, збільшенням дислокацій і вакансій.

Проте, на певному етапі ППД пластичне зміцнення супроводжується ще більш інтенсивним пластичним розпушенням матеріалу, яке супроводжується також падінням твердості (мікротвердості) (рис. 5).

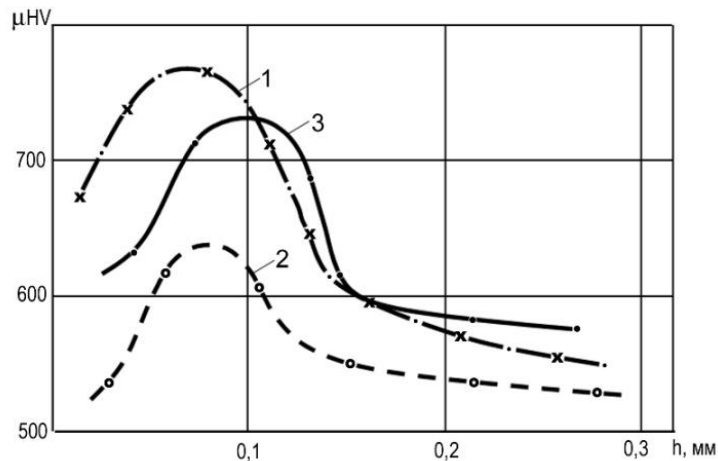


Рис. 5. Характер розподілу мікротвердості μHV по глибині поверхневого шару при обкочуванні прутка з ЕП718 кульками: 1 - 2 проходи с обтиском $\Delta h = 0,04 \text{ мм}$; 2 - 15 проходів, $\Delta h = 0,04 \text{ мм}$; 3 - 1 прохід, $\Delta h = 0,07 \text{ мм}$.

Відповідно до даних (рис. 5) і градуального графіку сплаву ЕП718, максимальне значення інтенсивності деформацій, для кривих 1 і 3, спостерігалось на глибині 0,1 мм і відповідає 820 та 750 одиниць μHV , відповідно. Визначити ж накопичену деформацію за результатами кривої 2 вже не є можливим.

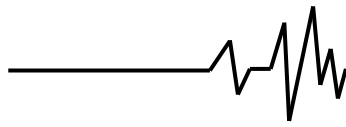
Таким чином, вимірювання твердості можна використовувати для визначення НДС матеріалу поверхневого шару заготовки на початкових стадіях процесу ППД і для визначення факторів, що зміщують область максимальних деформацій до поверхні заготовки, а також в якості критерію, який би регулював процес обробки за моментом падіння твердості зміцненого шару.

Якщо необхідно визначити ступінь деформації, накопичений за певне число проходів або час деформування, то за

$$\psi_u = \frac{1}{4} (2N)^{2n} [\psi_1^{2n} + 2I(\psi_1\psi_2)^n + \psi_2^{2n}] \leq 1 \quad (1)$$

Де I – інваріантний параметр, n – параметр функції пошкодженості, N – число циклів деформування.

Для ППД за основу приймемо складне «просто–складне», з використанням ступеневої двоетапне деформування в послідовності функції пошкодженості. Отримаємо:



$$\psi_u = \left(\frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_{*1}} \right)^{2n} + 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_{*1}} \right)^{2n} \cdot \left[a^{(1)} \cdot \beta_{ij}^{(1)} + b^{(1)} \cdot \left(b_{ik}^{(1)} \cdot b_{kj}^{(1)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \cdot \psi_{ij}^{(2)} + \psi_u^{(2)} \quad (2)$$

$$\psi_{ij}^{(2)} = \int_{\varepsilon_u^{(1)}}^{\varepsilon_u^{(2)}} \left[A(\varepsilon_u) \cdot \beta_{ij}(\varepsilon_u) + B(\varepsilon_u) \cdot \left(\beta_{ij}(\varepsilon_u) \cdot \beta_{ij}(\varepsilon_u) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] d\varepsilon_u \quad (3)$$

де $\varepsilon_u^{(k)}$, ($k = 1, 2$) – накопичена пластична деформація в кінці k -го етапу;

n – параметр ступеневої моделі функції пошкоджень;

$b^{(k)}$ – коефіцієнт тензорної не лінійності: визначається властивостями матеріалу $\left(|b^{(k)}| \leq \sqrt{6} \right)$;

$a^{(k)}$ – визначається коефіцієнтом $b^{(k)}$ и третім інваріантом тензора $\beta_{ij}^{(k)}$.

Побудована модель накопичення пошкоджень (2) дозволяє визначати величину використаного ресурсу пластичності при складному двоетапному деформуванні, коли на другому етапі (зміщення металу інструментом, після його втиснення) має місце складне деформування $\beta_{ij}(\varepsilon_u) \neq const$. При збільшенні етапів деформування (числа проходів) сумарно використаний ресурс пластичності визначається шляхом додавання значень, отриманих при двоетапному деформуванні.

З використанням моделі (2) отримано характер розподілу величини використаного ресурсу пластичності ψ_u по глибині поверхневого шару деталі, зміцненої методами ППД (рис. 6).

Таким чином, максимально використаний ресурс пластичності знаходиться під поверхнею на глибині приблизно 0,1 від глибини зміцненого шару. До речі, цей факт підтверджується характером руйнування поверхневого шару, який проявляється у вигляді відшарування (лущення) часток металу.

Оскільки при пластичній деформації відбувається пластичне розпушування матеріалу, то нами проведено дослідження зміни густини сталей і сплавів при різних схемах напружено-деформованого стану. Густина матеріалу зразків визначали шляхом трикратного гідростатичного зважування на аналітичних терезах моделі ВПР-200 з точністю 10^{-4} .

На рис. 7 приведено усереднена залежність відносної зміни густини металів $\Delta\rho/\rho_0$ від величини використаного ресурсу

пластичності ψ_u .

Дослідження показали, що на початкових стадіях деформування, при всіх видах випробування (стиск, кручення, розтяг), для ряду металів спостерігається незначна інтенсивність зменшення відносної густини. У сплаву Е1961 при осаджуванні до значень $\psi_u \leq 0,4$ густина навіть дещо збільшувалася. Титанові сплави ВТ8 и ВТ9 на початкових стадіях деформуються при відносно невеликій інтенсивності зменшення густини. У решти сталей і сплаву ЕП718 залежність інтенсивності зменшення густини від ψ_u виявилася близькою до лінійної. В міру вичерпання пластичності металів відносна зміна їх густини вирівнюється, а при значеннях $\psi_u = 0,4$ зменшення густини для досліджуваних металів склало $\Delta\rho/\rho_0 \approx 0,6\%$

Зменшення густини, а отже і відносне збільшення об'єму металу в міру вичерпання ресурсу пластичності, на нашу думку і пояснює ефект зменшення величини залишкових напружень стиску на поверхні виробів при ППД. Дійсно, характер розподілу залишкових напружень (рис. 4) відповідає характеру розподілу в поверхневому шарі інтенсивності деформацій (рис. 3), інтенсивності напружень (мікротвердості, рис. 5) і величини використаного ресурсу пластичності (рис. 6). В результаті найбільш стиснутими виявляються зони поверхневого шару, в яких при ППД накопичуються максимальні деформації і відбувається найбільше відносне збільшення об'єму матеріалу. При відсутності даних щодо відносного деформаційного збільшення об'єму для конкретного матеріалу, при значеннях $\psi_u \geq 0,6$ його можна визначити за усередненою залежністю 4 (рис. 7).

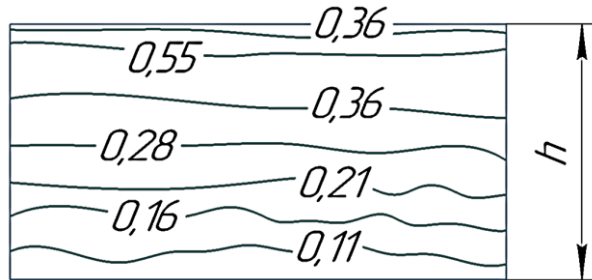


Рис. 6. Характер розподілу величини використаного ресурсу пластичності ψ_u по глибині поверхневого шару деталі, зміцненої методами ППД

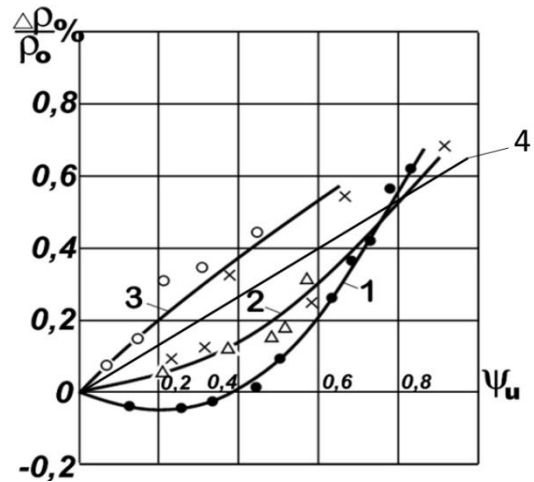


Рис. 7. Залежність відносної зміни густини металів $\Delta\rho/\rho_0$ від величини використаного ресурсу пластичності ψ_u : 1 – EI961; 2 – BT9; 3 – EP718

Для підвищення опору втомі слід використовувати технологічні прийоми, які зміщують зони з максимальною деформацією, твердістю і залишковими напруженнями стиску до поверхні деталі. При цьому слід дотримуватися обмежень щодо максимального використання ресурсу пластичності металу.

Для зміщення зон з максимальними залишковими напруженнями стиску до поверхні деталі нами запропоновано використовувати два підходи: обробляти на заключних етапах поверхневий шар кульками мінімального діаметру і проведення ППД після холодного газодинамічного нанесення на поверхню деталі мідного або алюмінієвого покриття.

В якості досліджуваного процесу ППД був прийнятий процес обкочування циліндричних заготовок роликками і кульками. Для реалізації процесу були спроектовані

обкатники, які передбачають обкочування деталей на токарних верстатах.

На рис. 8 представлений пристрій для обкочування, що передбачає використання кульок різних діаметрів. Зусилля на кульки та глибина їх проникнення в матеріал деталі регулюється пружиною.

Пристрій для обкочування містить основу 1, яка закріплюється в різцеутримувачі універсального токарного верстату, і важелі 2 та 3 які мають змогу повертатися відносно основи 1 на осі 4 по направляючій колонці 5 під дією пружини 6, встановленої на відкидному болті 7. В важелях 2 та 3 встановлені корпуси 8 та 9 з деформуючими кульками 10 діаметром 8 мм та 11 діаметром 3 мм. Відносна глибина втискування кульок 10 та 11 в заготовку 12 забезпечується гайкою 13, а також зміною діаметрів кульок 10, 11.

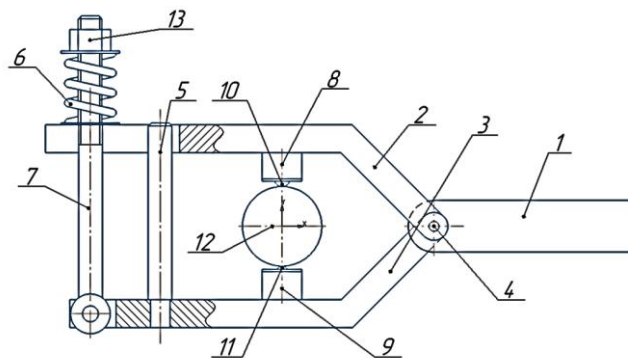


Рис. 8. Вид обкатника із використанням кульок різних діаметрів

Пристрій для зміцнення поверхонь циліндричних металевих деталей працює наступним чином: заготовка 12 кріпиться в патроні і задній бабці універсального токарного

верстату. Основа 1 пристрою встановлюється в різцеутримувачі верстата, а робоча зона обкочування утворюється провертанням важелів 2 та 3 навколо осі 4 з входженням в паз важеля



направляючої колонки 5 і замиканням пристрою болтом 7 зі створенням заданого зусилля пружиною 6 та гайкою 13. Корпус 8 з деформуючою кулькою 10 зміщений у напрямі поздовжньої осі заготовки на величину не меншу від ширини канавки, що формується на заготовці кулькою 11. В корпусі 8 по ходу обточування встановлюється одна кулька діаметром 8 мм, що забезпечує необхідну глибину зміцнення поверхневого шару заготовки, кулька 11 діаметром 3 мм підбирається з умови сумарного перекриття канавки утвореною кулькою 10 і необхідності створення врівноваженої системи сил в зоні деформування, для забезпечення стабільності протікання процесу поверхневого зміцнення заготовки. При цьому розмір найменших кульок вибирається з умови максимального наближення зони найбільших залишкових напружень стиску до поверхні заготовки. Регулювання величини втискування кульок 10, 11 забезпечується також за допомогою гайки 13.

Включається обертання заготовки і подача переміщення обкатника вздовж осі супорта на величину в 4-5 раз меншу від ширини пластичного відбитку, утвореного першою по ходу подачі кулькою. При цьому деформування передбачає обмеження використаного ресурсу пластичності металу величиною $\psi_u \leq 0,4$, що можна попередньо визначити з використанням наведеної вище математичної моделі (2) та остаточно встановити за умови досягнення максимальних службових характеристик виробу.

Наступним способом формування на поверхні деталі максимальних залишкових напружень стиску є нанесення перед ППД спеціальних допоміжних покриттів.

Переважає більшість традиційних газотермічних методів нанесення покриття відбувається при значних температурних впливах на поверхню деталі, що є недопустимим для поверхні, обробленої методами ППД. Лише газодинамічне напилення [5] може забезпечити допустимий температурний режим створення спеціальних допоміжних покриттів із збереженням властивостей поверхні, обробленої методами ППД.

Технологія газодинамічного нанесення покриттів включає в себе нагрів стисненого газу (повітря), подачу його в надзвукове сопло (рис. 9) і формування в цьому соплі надзвукового повітряного потоку, подачу в цей потік порошкового матеріалу, прискорення цього матеріалу в соплі надзвуковим потоком повітря і направлення його на поверхню оброблюваного виробу

Надзвукове сопло з осьовою подачею матеріалу для напилення (рис. 9) складається з стовбура 3, що має циліндричний отвір постійного діаметру, в який з лівого боку водиться конус 5.

Конус 5 виконано таким, що є можливість регулювання зазору С, між конусом 5 і отвором стовбура. Регулювання зазору С дозволяє регулювати тиск та швидкість течії робочого газу і, відповідно, регулювати параметри та якість нанесеного покриття.

Для створення сприятливих умов нанесення якісного покриття мають бути дотриманими наступні параметри:

- робочий газ – повітря;
- температура робочого газу – 300-400° С;
- тиск робочого газу 0,5-1 МПа;
- швидкість напилювальних частинок 400-1000 м/с.

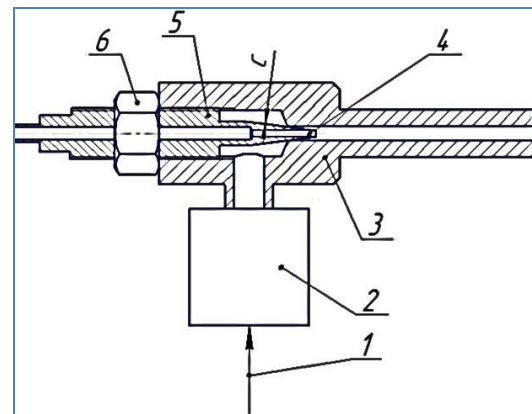


Рис. 9. Надзвукове сопло з осьовою подачею порошку: 1- подача стиснутого газу (повітря), 2 – нагрівач газу, 3 – стовбур, 4 – канал подачі порошку, 5 – конус з можливістю регульованого переміщення, 6 – гайка фіксатор

У якості матеріалу покриття використовуються порошки металів, сплавів або їх механічні суміші. Зміною режимів можна змінювати пористість і товщину нанесеного покриття. Порошкові частинки нагріваються до відносно невеликих температур (до 300° С). Поверхня деталі нагрівається до 150°-200°С. Процес не створює значного шуму та піддається автоматизації.

Для реалізації процесу газодинамічного нанесення покриття у Вінницькому національному аграрному університеті створено спеціальне обладнання, показане на рис. 10.

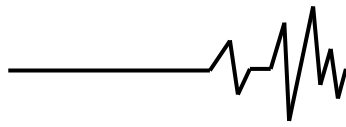


Рис. 10. Газодинамічний пристрій для нанесення покриття

Газодинамічний пристрій для нанесення покриття складається з двох основних складових частин: нагрівач стиснутого повітря та прискорювач нагрітого стиснутого повітря.

В корпусі нагрівача стиснутого повітря встановлено керамічні диски з отворами, через які прокладено нагрівальні ніхромові елементи, розігріті до температури 800°C , контактуючи з якими повітря нагрівається до температури $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$. Далі нагріте повітря потрапляє до надзвукового сопла (рис. 9) в стовбур 3. Надзвукове сопло містить конус 5, який в сполученні із отвором у стовбурі 3 утворює кільцевий критичний перетин С. Проходячи через цей перетин стиснуте повітря прискорюється до надзвукової швидкості, спричиняючи падіння тиску на виході конуса 5. В результаті у отворі конуса 5 тиск падає нижче атмосферного, створюючи ефект ежекції і засмоктуючи напилювальний порошок. Порошок розганяється надзвуковим повітряним потоком та переноситься на поверхню деталі. В гарячому повітряному потоці порошок нагрівається та вдаряючись об поверхню деталі деформується і створює з нею молекулярні зв'язки. Таким чином утворюється суцільне покриття. В якості матеріалу покриття можуть використовуватись порошки міді, алюмінію, бронзи, бабіту та інших кольорових металів, а також їх сплавів. Розмір порошкових частинок повинен бути в межах $40\text{--}80$ мкм.

Проведено експериментальне нанесення на сталеву пластину алюмінієвого порошку, в результаті якого утворився суцільний шар алюмінієвого покриття (рис. 11).

На рис. 12 показана схема газодинамічного нанесення суцільного покриття на циліндричну деталь.

Проведення операцій ППД для поверхонь деталей з нанесеним покриттям дозволяє змістити максимально зміцнену зону до поверхні, збільшивши таким чином опір втомі при роботі

деталей в умовах повторно-змінних навантажень. При необхідності в подальшому покриття з поверхні деталі можна видалити.



Рис. 11. Газодинамічне нанесення на пластину алюмінієвого покриття

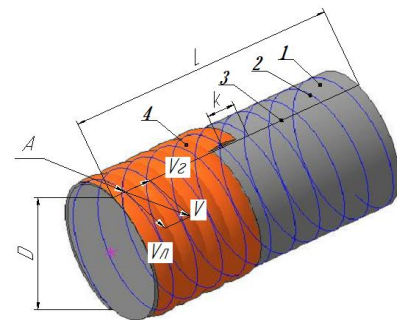


Рис. 12. Схема холодного газодинамічного нанесення суцільного покриття на циліндричну деталь: 1 – деталь що напилюється; 2 – спіральна траєкторія руху фігури напилення; 3 – прямолінійна траєкторія руху напилювального пристрою; 4 – покриття.

$V_{\text{л}}$ – швидкість обертання деталі в точці напилення (A), $V_{\text{г}}$ – швидкість руху фігури напилення (A) вздовж траєкторії руху напилювального пристрою. V – швидкість фігури напилення вздовж спіральної траєкторії руху. L – довжина поверхні, що обробляється, k – крок спіральної лінії, D – діаметр деталі

Висновки. 1. Опір втомі деталей, що працюють в умовах повторно-змінного навантаження, залежить від механічних характеристик матеріалу поверхневого шару: міцності, пластичності, рівня залишкових напружень стиску, які можна формувати методами ППД.

2. Розроблена модель визначення використаного ресурсу пластичності металів при ППД, що дозволяє забезпечувати якісні характеристики поверхневого шару.

3. Встановлено характер розподілу напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності по глибині поверхневого шару, в залежності від параметрів процесу ППД.



4. Обгрунтована гіпотеза, що основним фактором формування залишкових напружень стиску при ППД є зменшення густини металів, яке пов'язане з використанням ресурсу пластичності.

5. Розроблені способи зміщення шару з максимальним зміцненням і залишковими напруженнями стиску до поверхні деталі шляхом використання деформівного інструменту менших розмірів на наступних проходах та газодинамічного нанесення спеціального допоміжного покриття перед проведенням ППД.

Список використаних джерел

1. Пширков В. Ф., Пудков С. И. Поверхностно-пластическое деформирование лопаток компрессора ГТД стальными и стеклянными шариками. *Авиационная промышленность*. 1981. №9, 18-25.

2. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. Москва: Машиностроение, 1985. – 255 с.

3. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”. 1998. – 195 с.

4. Матвийчук В. А. Математическая модель повреждаемости металлов при сложном двухэтапном деформировании [Электронный ресурс] / Вісник ДДМА. 2009. № 3Е (14). - С. 126-130. – Режим доступа: www.nbu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/pdf/20.pdf.

5. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу: Пат. 110552 Україна, МПК6 С23С24/00 № а 201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1. 12 с.

6. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Швайко В. М. Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. 528 с.

7. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении деталей / Матвийчук В. А., Егоров В. П., Михалевич В. М., Покрас В. Д. // *Кузнечно-штамповочное производство*. 1993. №10. 10-13. с.

References

1. Pshirkov V.F., Pudkov S. I. (1981) *Surface plastic deformation of GTE compressor blades with steel and glass balls*. Aviation industry. 9, 18-25 [in Ukrainian]

2. Rykovsky B. P., Smirnov V. A., Shchetinin G.M. (1985) *Local hardening of parts by surface hardening*. Moscow: Engineering. [in USSR]

3. Mikhalevich V. M. (1998) *Tensor models accumulated post-purchase*. Vinnitsya: "UNIVERSUM - Vinnitsya". [in Ukrainian]

4. Matviychuk V. A. (2009) *Mathematical model of metal damage during complex two-stage deformation* [Electronic resource] *Visnik DDMA*. 3E (14). 126-130. - Retrieved from www.nbu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/pdf/20.pdf.

5. *Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material*. Pat. 110552 Ukraine, IPC6 C23C24 / 00 № а 201405543; claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. 12 sec.

6. Kaletnik G. M., Chauso M. G., Shvaiko V. M. (2013) *Fundamentals of engineering methods for technical and practical studies* / - Kyiv: "High-Tech Pres", [in Ukrainian]

7. Matviychuk V. A., Egorov V. P., Mikhalevich V. M., Pokras V. D (1993) *Analysis of deformability of metals during surface hardening of parts*. Forging and stamping.10, 10-13. [in Russia].

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПОВТОРНО- ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В статье приведены результаты разработки процессов с целью улучшения эксплуатационных свойств деталей, работающих при повторно-переменных нагрузках, с учетом обоснованных параметров поверхностного пластического деформирования (ППД) и холодного газодинамического напыления покрытий. Проанализировано влияние на параметры рабочего поверхностного слоя, характер распределения в нем напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя материала и остаточных напряжений сжатия, а также значений использованного ресурса пластичности поверхностного слоя материала заготовки, параметров технологического процесса ППД. В статье показано, что главным фактором формирования остаточных напряжений сжатия при ППД является уменьшение плотности поверхностного слоя заготовки, которое связано с использованием ресурса пластичности. Предложена модель расчета использованного ресурса пластичности материала заготовки при ППД, которая позволяет обеспечивать улучшенное качество поверхностного слоя деталей. Предложен способ перемещения слоев заготовки с максимальным наклепом и остаточными напряжениями сжатия к поверхности детали путем применения деформирующего инструмента уменьшенных размеров на следующих проходах с нанесением покрытия на поверхность детали газодинамическим напылением перед проведением ППД.

Холодное газодинамическое нанесение покрытий путем напыления, в отличие от большинства известных газотермических методов нанесения покрытий которые проходят



при значительных температурных воздействиях на поверхность детали, что является недопустимым для поверхностей обработанных методами ППД, обеспечивает допустимый температурный режим создания специальных вспомогательных покрытий с сохранением свойств поверхности, обработанной методами ППД.

Технология газодинамического нанесения покрытий путем напыления включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), направление его в сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушно-порошковой потока, напыляемого материала (медь, алюминий), ускорение этого порошкового материала до сверхзвуковых скоростей и направления его на поверхность обрабатываемого изделия. В результате чего на поверхности изделия образуется специальное вспомогательное покрытие (медное или алюминиевое), которое обеспечивает улучшенные параметры процесса ППД.

Ключевые слова: холодное газодинамическое нанесение покрытия, напыление, поверхностное пластическое деформирование, использованный ресурс пластичности, остаточные напряжения сжатия.

INCREASING THE DURABILITY OF DETAILS TO WORK UNDER REPEATABLE LOADS

The article presents the results of the development of processes to improve the performance of parts operating under repeated variable loads, taking into account the reasonable parameters of surface plastic deformation (SPD) and cold gas-dynamic spraying of coatings. The influence on the parameters of the working surface layer, the nature of the distribution of the stress-strain state of

the surface layer of material and residual compressive stresses, as well as the values of the used resource of plasticity of the surface layer of the workpiece, the parameters of the SPD process. The article shows that the main factor in the formation of residual compressive stresses during SPD is the decrease in the density of the surface layer of the workpiece, which is associated with the use of the plasticity resource. The model of calculation of the used resource of plasticity of material of preparation at SPD which allows to provide the improved quality of a surface layer of details is offered. A method of moving the workpiece layers with maximum hardening and residual compression stresses to the surface of the part by applying a deforming tool of reduced size in the following passes with coating the surface of the part with gas-dynamic spraying before SPD.

Cold gas-dynamic coating by spraying, in contrast to most known gas-thermal coating methods that take place under significant temperature effects on the surface of the part, which is unacceptable for surfaces treated by SPD methods, provides a permissible temperature regime for creating special auxiliary coatings while preserving surface properties SPD.

The technology of gas-dynamic coating by spraying includes heating the compressed gas (air), directing it into the nozzle and forming in this nozzle supersonic air-powder flow, sprayed material (copper, aluminum), acceleration of this powder material to supersonic speeds and directing it to the surface of the processed product. As a result, a special auxiliary coating (copper or aluminum) is formed on the surface of the product, which improves the parameters of the SPD process.

Keywords: cold gas-dynamic coating, spraying, surface plastic deformation, used plasticity resource, residual compressive stresses.

Відомості про авторів

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Гайдамак Олег Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua).

Матвийчук Виктор Андреевич - доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Гайдамак Олег Леонидович - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua)

Matviychuk Viktor Andreevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Gaidamak Oleg Leonidovich - Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University .