

## У СТВОРЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИГРЕСИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

УДК 621.771

### ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВИРОБІВ

*Матвійчук В.А.*

*Драчишин В. І.*

*Вінницький національний аграрний університет*

*В статье рассмотрено влияние параметров поверхностно-пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние и деформируемость поверхностного слоя изделий. Предложен подход к разработке технологических параметров с целью повышения служебных характеристики изделий.*

*The article considers the influence of parameters of surface-plastic deformation on the stress-strain state and deformivnist surface layer products. The approach to the development of technological options to improve business performance products.*

#### **Вступ**

Поверхнєвє пластичнє деформування (ППД) застосовується для формування певних робочих характеристик поверхнєвого шару виробів і набуло завдяки своїм технологічним можливостям досить широкого застосування [1]. Поверхнєвий шар при ППД формується внаслідок складних взаємовпливів: багато кратних пружних і пластичних деформацій, зміни характеристик міцності і пластичності матеріалу, тертя і теплових процесів, зміни мікро і макроструктури, щільності матеріалу, мікро геометрії поверхні тощо.

Дослідження впливу ППД на стан поверхнєвого шару заготовки показали, що в поверхнєвому шарі змінюються характеристики міцності і пластичності матеріалу, зростає твердість, крихкість, внутрішнє тертя, змінюється структура і текстура матеріалу, виникають значні залишкові напруження стиску. Таким чином, ППД дозволяє формувати підвищені службові характеристики готових виробів, а також заготовок під наступнє деформування.

Разом з тим, в силу складності і не стаціонарності процесів ППД, прогнозування необхідних якісних характеристик поверхнєвого шару виробів викликає значні труднощі. Тому запровадження ППД для отримання певних властивостей виробу супроводжується трудомісткими експериментами. Причому результати таких експериментів розповсюджуються, як правило, лише на певні характеристики конкретних виробів з конкретного матеріалу.

Найбільш узагальнюючими, при формуванні якісних виробів методами ППД, є характеристики міцності і пластичності металу, а також рівень і характер розподілу залишкових напружень стиску в поверхнєвому шарі виробу. Особливо важливою є інформація про величину і характер розподілу в поверхнєвому шарі накопиченої деформації і залишкового ресурсу пластичності. Відзначені характеристики є визначальними в

підвищенні витривалості виробів, а залишковий ресурс пластичності визначає також здатність матеріалу до подальшої пластичної обробки.

### **Мета дослідження і постановка завдання**

Метою дослідження є оцінка впливу технологічних параметрів ППД на стан поверхневого шару для їх обґрунтованого вибору при формуванні високих робочих характеристик виробів.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- визначити напружено-деформований стан (НДС) поверхневого шару і розробити моделі контактної взаємодії інструменту з заготовкою в залежності від технологічних параметрів процесу ППД;
- оцінити деформівність матеріалу заготовок при ППД;
- розробити шляхи підвищення якості виробів оброблюваних методами ППД.

### **Результати**

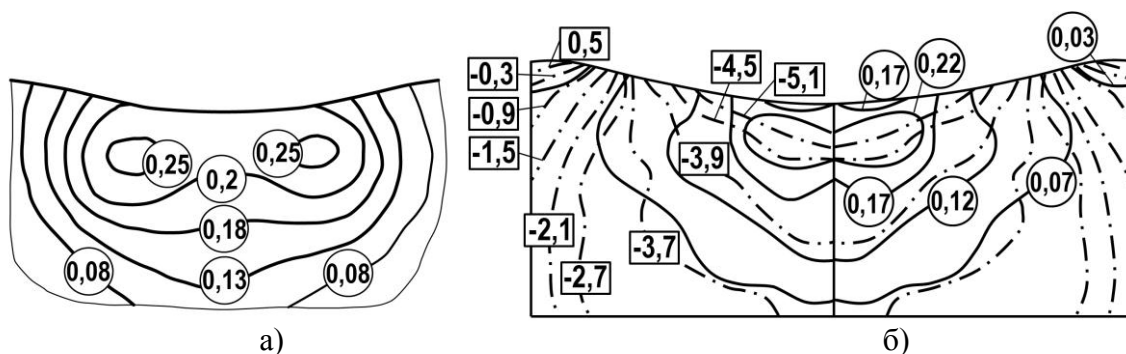
З метою дослідження впливу різних факторів на характеристики поверхневого шару матеріалу заготовок проведено моделювання процесів ППД шляхом втискування кульки і ролика в плоский напівпростір. Моделювання проводили на сплаві ЕП718, який добре зміцнюється і має сильну залежність твердості від інтенсивності деформацій. Кульку втискували на різну глибину із забезпеченням різних граничних умов на контакт: насухо, а також із застосуванням у якості мастила колоїдного графіту, поліетилену, свинцевої і мідної фольги. На рис. 1, а приведений типовий характер розподілу інтенсивності деформацій  $\varepsilon_{II}$  в зоні пластичного відбитку, отриманий методом вимірювання твердості. Таким чином, характер деформованого стану в зоні відбитку є досить нерівномірним. Інтенсивність деформацій на поверхні відбитку сягає лише 50-80% максимальної. Найбільша інтенсивність деформацій спостерігається поблизу центра відбитку і віддалена від поверхні контакту на глибину  $\approx 0.1d$ , при цьому глибина проникнення пластичної зони  $h_{пл} \approx (1,5-1,6)d$ , де  $d$  - діаметр відбитку або його ширина.

Для дослідження НДС пластичної зони при втискуванні інструменту застосовано також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії  $R$ -функцій. При цьому здійснювалося поетапне втискування в заготовку кульки (вісе симетрична задача) та багаторазове поетапне втискування ролика (плоска задача). Характер розподілу ізоліній  $\varepsilon_{II} = const$  в зоні відбитку (рис. 1, б), отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості (рис. 1, а).

В результаті багаторазового послідовного втискування інструменту, яке спостерігається при ППД, відбувається зміщення часток металу у різних напрямках, що приводить до зміни знаку компонент деформацій та напружень. Напружений стан оцінювали за допомогою показника жорсткості 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.

Показник жорсткості напруженого стану змінюється від величин, що відповідають всесторонньому стиску ( $\eta = -5 \dots -3$ ) на осі симетрії відбитку (рис. 1 б), до зсуву-розтягу

( $\eta \geq 0$ ) на краю відбитку, в місці утворення пластичного валика. При втискуванні інструменту на ділянці між відбитками, показник  $\eta$  дещо зростає через зменшення гідростатичного підпору з боку відбитків. В центрі заново утвореного відбитку він становить  $\eta = -2 \dots -4$ , а на його границі  $\eta = 0 \dots 1$ .



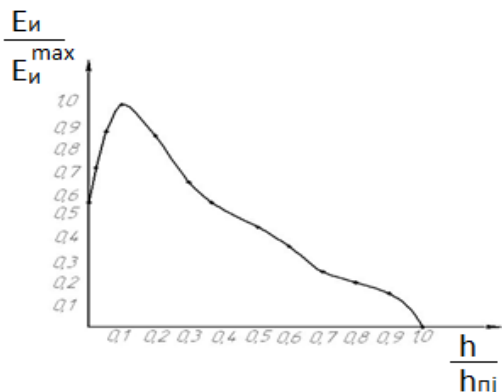
**Рис. 1. Розподіл в зоні пластичного відбитку ізоліній: а)  $\varepsilon_u = \text{const}$  (O), отриманих вимірюванням твердості; б)  $\eta = \text{const}$  (□) і  $\varepsilon_u = \text{const}$  (O), отриманих методом подільних сіток**

Отже, при ППД спостерігається складне багатоетапне деформування, сутність якого полягає в утворенні напливів поблизу пластичних відбитків, з наступним їх втискуванням. При цьому відбувається позмінне перетворення напливів у лунки, зміна знаку компонент деформацій і показника  $\eta$  від  $\eta = -2 \dots -4$ , до  $\eta = 0 \dots 1$  для кожної матеріальної точки поблизу поверхні заготовки.

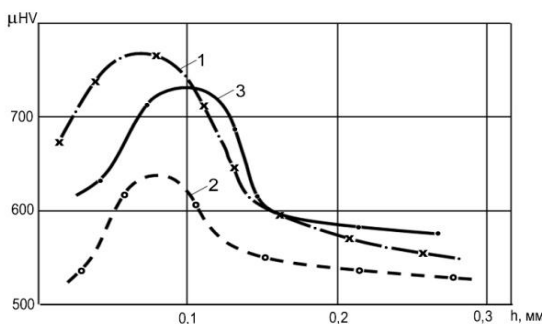
При використанні ефективного змащення висота валика зменшується на 30-40%, а зона максимальних деформацій зміщується у напрямку поверхні. У випадку багатоетапного деформування характер розподілу деформацій вздовж поверхні заготовки стає більш рівномірним. Проте по глибині поверхневого шару він практично не змінюється і зона максимальних деформацій залишається на деякій відстані від поверхні (рис. 2 а), яка залежить від розміру пластичного відбитку, а отже від розміру інструменту.

На певному етапі ППД відбувається інтенсивне пластичне розпушування матеріалу, яке супроводжується падінням твердості (характеристик міцності) і свідчить про подальший негативний вплив процесу ППД на службові характеристики поверхневого шару (рис. 2 б, крива 2).

Таким чином, вимірювання твердості можна використовувати для визначення НДС матеріалу поверхневого шару заготовки лише на початкових стадіях процесу ППД, а також для встановлення факторів, що зміщують зону максимальних деформацій до поверхні заготовки. При багатоетапному процесі ППД величину деформації можна визначити вимірюванням твердості лише при обмеженому числі проходів (тим меншому, чим менше показник зміцнення металу). Накопичену же за весь період деформацію можна визначити як сумарну за проходами або часом обробки. Момент падіння твердості при ППД слід використовувати в якості критерію обмеження тривалості процесу.



а)



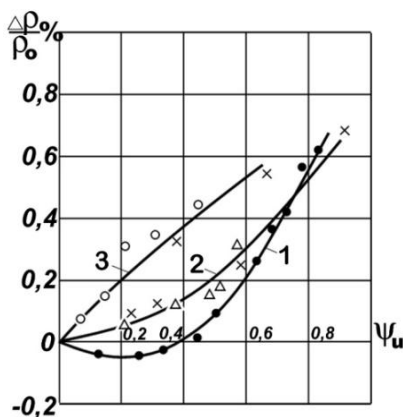
б)

**Рис.2. Характер розподілу по глибині зміцненого шару параметрів: а) – інтенсивності деформацій  $\varepsilon_u = \text{const}$  при багатоетапному втискуванні шарика зі зміщення по площині; б) - мікротвердості  $\mu\text{HV}$  при обкочуванні прутка з ЕП718 шариками: 1 - 2 проходи с обтискуванням  $\Delta h = 0,04\text{мм}$ ; 2 - 15 проходів,  $\Delta h = 0,04\text{мм}$  (перенаклепування); 3 - 1 прохід,  $\Delta h = 0,07\text{мм}$ .**

Розміщення максимальних деформацій під поверхнею заготовки (рис. 1, 2 а) приводить до того, що і максимальне вичерпання ресурсу пластичності металу також відбувається на певній глибині, яка залежить від розміру інструменту і глибини його втискування. Тому при повному вичерпанні ресурсу пластичності ( $\psi_u = 1$ ) руйнування поверхневого шару при ППД відбувається не на поверхні, а у вигляді відшаровування пластинок металу у формі луски.

Для визначення ресурсу пластичності, використаного на певній стадії ППД, за спрощену модель було прийнято циклічний повтор комбінацій двох етапного деформування. Величину використаного ресурсу пластичності у випадку багатоетапного деформування визначали за допомогою критеріальної залежності, розробленої в роботі [3]. Експериментальна перевірка за моментом початку руйнування матеріалу поверхневого шару при ППД підтвердила достовірність даного критерію.

Експериментально підтверджено, що використання ресурсу пластичності супроводжується пластичним розпушуванням або зменшенням щільності металу (рис. 3) [4].



**Рис. 3. Залежність відносного збільшення об'єму металів  $\Delta\rho/\rho_0$  від величини**

використаного ресурсу пластичності  $\psi_u$ : 1 – сплав ЭИ961, ● – стиск; 2 – сплав ВТ9,  $\Delta$  – кручення, х – розтяг; 3 – сплав ЭП718, о – стиск, х – розтяг

Як видно з рисунку, на початкових стадіях деформування більшості металів спостерігається незначна інтенсивність зменшення щільності. Сплав ЭИ 961, при осаджуванні до значень  $\psi_u \leq 0,4$ , навіть дещо ущільнюється, і лише після відбувається його пластичне розпушування. Титанові сплави ВТ8 и ВТ9 деформуються при відносно незначній інтенсивності пластичного розпушування на початкових стадіях. У сплаву ЭП 718 залежність зменшення щільності від величини використаного ресурсу пластичності виявилася близькою до лінійної. Таким чином, величина пластичного розпушування при 50% вичерпанні ресурсу пластичності для різних матеріалів і видів випробування коливається в межах  $\Delta\rho/\rho = 0,1 - 0,4\%$ . З ростом вичерпаного ресурсу пластичності металів величина їх пластичного розпушування вирівнюється, так що при значеннях  $\psi_u = 0,8$  відносне збільшення об'єму для досліджуваних металів складало  $\Delta\rho/\rho \approx 0,6\%$ .

Максимальне відносне збільшення об'єму металу в зоні найбільших деформацій внаслідок вичерпання ним ресурсу пластичності і пояснює ефект зменшення залишкових напружень стиску на поверхні деталей при ППД. При цьому характер розподілу залишкових напружень (рис. 4) відповідає характеру розподілу в поверхневому шарі інтенсивності деформацій (рис. 2 а) і величини використаного ресурсу пластичності. В результаті найбільш стиснутою виявляється зона під поверхнею, в якій при ППД накопичуються максимальні деформації і відбувається найбільше відносне збільшення об'єму металу, тобто зона, віддалена від поверхні на відстань  $\approx 0.1d$ .

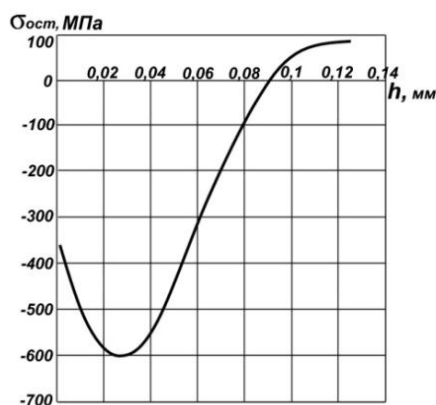


Рис.4. Епюра залишкових напружень  $\sigma_{ост}$  по глибині  $h$  поверхневого шару із сплаву ЭП718, зміцненого при ППД шариками діаметром  $\approx 0,2$  мм.

Встановлення того, що максимальне накопичення деформацій, розпушування і руйнування металів відбувається на певній глибині під поверхнею виробу, визначає шляхи вдосконалення процесів ППД. Для підвищення робочих характеристик виробів необхідно використовувати технологічні прийоми, які зміщують зони з максимальною деформацією до

поверхні. Це дозволить досягнути максимальної твердості і залишкових напружень стиску на поверхні і забезпечити більш високі якісні параметри виробів.

Проведене дослідження показало, що до таких прийомів можна віднести: використання на заключних етапах ППД тіл деформування менших розмірів; використання ефективного змащення і м'яких пластичних оболонок для зменшення сил тертя; спрямування сили дії інструменту під кутом до поверхні для створення активних сил тертя і зменшення розмірів застійних зон.

Одним з технологічних прийомів, що дозволяє покращувати умови змащення та зменшувати розміри застійних зон, є застосування при ППД вібрацій. Використання вібраційних технологій при ППД є достатньо перспективним. Так, накладання вібрації на інструмент, що обточує або вигладжує поверхню виробів, дозволяє реалізовувати знакозмінне навантаження і управляти характером НДС матеріалу поверхневого шару, а також покращувати умови змащення контактної зони. Вібраційна технологія, що передбачає безрозмірну обробку виробів у гранульованому середовищі робочого наповнювача дає можливість через управління параметрами вібрацій забезпечити сприятливий мікро наклеп поверхневого шару і зменшувати шорсткість поверхні. У Вінницькому національному аграрному університеті розроблено пристрої і відпрацьовуються технологічні параметри ППД з використанням вібраційних технологій.

При використанні найбільш ефективних процесів ППД необхідно створювати умови, що забезпечують найменшу інтенсивність вичерпання ресурсу пластичності в поверхневому шарі виробу. Як показали дослідження [4], для деталей, які працюють на витривалість, величину використаного при ППД ресурсу пластичності слід обмежувати умовою  $\psi_u \leq 0,4$ .

### **Висновки.**

При збільшенні накопиченої деформації і використаного ресурсу пластичності збільшується відносний об'єм металу. Максимальні деформації і використаний ресурс пластичності формуються при ППД в поверхневому шарі на певній глибині, що приводить до зменшення залишкових напружень стиску на поверхні виробу. Для підвищення службових характеристик виробів необхідно назначати умови деформування, які зміщують зону максимальних деформацій до поверхні і обмежувати процес ППД за величиною використаного ресурсу пластичності. Ефективними напрямками при цьому є зменшення пластичного відбитку, поліпшення умов змащення і зменшення застійних зон деформацій.

### **Література**

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Смелянский В.М., Калпин Ю.Г., Бариков В.В. Исчерпание запаса пластичности металла в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием// Вестник машиностроения. 1990. №8. С. 54-58.
3. Матвийчук В.А., Егоров В.П., Михалевич В.М., Покрас В.Д. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении деталей// Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №10. С. 10-13.
4. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.