

УДК 621.867

Лариса Данильченко, к.т.н., доц.; Дмитро Радик, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Анотація. Встановлено вплив термодинамічних складових на міцнісні властивості поверхневого шару деталей методами пластичного деформування, отримано рівняння енергетичного балансу локального об'єму, сформованого при зміцненні поверхонь деталей.

Ключові слова: пластична деформація, поверхневий шар, теплова енергія

Larysa Danylchenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Dmytro Radyk, Ph.D., Assoc. Prof.

INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC STATE OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION PROCESS

Abstract. The influence of thermodynamic components on the strength properties of the surface layer of parts by plastic deformation methods is determined, and the equation of energy balance of the local volume formed during the hardening of parts surfaces is obtained.

Keywords: plastic deformation, surface layer, thermal energy

Процес поверхневого пластичного деформування (ППД) - це сукупність складних взаємопов'язаних явищ, які зумовлюють формування якісно нового поверхневого шару з покращеними фізико-механічними характеристиками. Основною характеристикою ефективності зміцнення тим чи іншим методом ППД слугує підвищення експлуатаційних властивостей деталей, таких як опір втомлюваності, контактна витривалість й зносостійкість. Однак, їх визначення залежно від багатьох параметрів процесу є тривалим й працемістким процесом.

До найперспективніших методів вирішення цього завдання належить метод енергетичної оцінки явищ і умов перебігу процесу ППД. Оброблення ППД пов'язане з роботою, затраченою на зміцнення поверхневого шару (ПШ), що своєю чергою залежить від енергетичного стану. Отже, поверхнева енергія є однією з основних характеристик матеріалу, що визначають його деформованість, а також фізико-механічні властивості ПШ після ППД. У галузі оцінки механічних властивостей матеріалів, їх опору пластичній деформації залежно від напруженого стану швидкісних, температурних режимів деформування, хімічного й фазового складу, а також їх структури накопичено великий експериментальний досвід. Особливості більшості досліджень, проведених у цьому напрямку, полягають в тому, що вони розглядаються з позиції механіки твердого тіла в рамках теорій пружності та пластичності. На основі цих досліджень запропоновано багато інженерних методів розрахунку характеристик ПШ та експлуатаційних властивостей деталей [1]. Однак механічні теорії, що застосовуються для опису процесу ППД, базуються на низці припущень. Це в багатьох випадках спрощує завдання, але при цьому віддаляє його від дійсності.

На теперішній час в механічних теоріях, що застосовуються для опису процесу поверхневого пластичного деформування (ППД) активно розвивається новий напрям, заснований на термодинамічному розгляді механізмів і закономірностей пластичної деформації під час руйнування матеріалів. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження з кінетики деформації при руйнуванні різних матеріалів, обговорення яких міститься в багатьох опублікованих роботах, дають змогу з урахуванням сучасних уявлень підійти як до опису явищ процесу ППД, так і до їх енергетичної оцінки.

Відповідно до сучасних уявлень будь-який процес деформування та руйнування твердих тіл є кінетичним і незворотнім незалежно від фізико-хімічної природи матеріалу, його структури, а також умов навантаження. Це положення повною мірою стосується і процесу ППД, оскільки за своєю суттю, він є процесом об'ємної пошкоджуваності матеріалу, за якого в деформованому елементі ПШ зароджуються та накопичуються різного роду дефекти та пошкодження.

Подання процесу ППД як кінетичного ґрунтується на двох експериментально встановлених фактах, перший з яких свідчить про його статистичний характер, який розкриває його феноменологічну сторону. В основі феноменологічного процесу лежить залежність зміцнення елементу ПШ від силових параметрів навантаження і часу (циклів) їх впливу. З аналізу цієї залежності випливає, що якщо два процеси ППД, що супроводжуються зміцненням унаслідок внутрішньої пошкоджуваності елементу ПШ, протікають як при вищих зовнішніх силових параметрах навантаження, так і за нижчих, то відмінність у поведінці деформованого елементу ПШ залежить лише від швидкості (ступеня) його пошкоджуваності.

Характерною ознакою статистичного процесу є те, що у кожен момент часу (або циклу формування елементу ПШ) обраним умовам навантаження відповідає певний ступінь його пошкоджуваності. Як тільки пошкоджуваність матеріалу в локальному мікрооб'ємі перевищує граничне (критичне) значення, починається процес його руйнування у вигляді мікро- і макропорушень під впливом тривалості оброблення ППД на опір втоми та зносостійкість, з появою на поверхні ознак руйнування (мікротріщини) експлуатаційні показники ПШ починають знижуватися. Це дає змогу припускати, що під час ППД існує критична величина накопичення пошкоджуваності, за якої забезпечується найбільший ефект зміцнення поверхні, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики деталей.

Якщо розглядати процес ППД з позиції термодинамічної теорії, то, відповідно до її основних положень, поверхневий шар будь-якого твердого металевого тіла, що піддається деформуванню в процесі ППД так само, як і саме тіло, структурно приймається як квазісуцільне та неоднорідне середовище, в якому статистично рівномірно розподілені структурні елементи й різного роду дефекти та пошкодження. Одні з них є внутрішніми джерелами елементарних дефектів, інші - перешкодами для їх руху. Фізично макроскопічне явище пластичної деформації, пошкоджуваності та руйнування елементу ПШ у процесі ППД розглядається як сукупність величезної кількості мікроскопічних елементарних атомно-молекулярних перегруповань, що зумовлюють рух, взаємодію і знищення на стиках дефектів, інші перешкоджають їх руху, взаємодії та знищенню.

Швидкість пластичної деформації елементу визначається швидкістю руху та знищення елементарних дефектів за рахунок флуктуації теплової енергії під впливом зовнішніх сил. Пошкоджуваність матеріалу в процесі ППД пов'язане з накопиченням у деформованих елементах ПШ різних дефектів і скупчень. Руйнування макроскопічного елементу ПШ відбувається під час подальшого деформування об'ємів, що мають граничну щільність дефектів.

Таким чином, енергетичний процес ППД можна інтерпретувати як процес одночасного перебігу в деформованих елементах ПШ двох протилежних взаємопов'язаних явищ:

- зростання щільності прихованої енергії E_{np} дефектів і пошкоджень, що накопичуються в матеріалі за рахунок роботи A_{np} ;
- зниження значення E_{np} за рахунок різних релаксаційних процесів, що відбуваються усередині деформованого елементу ПШ.

При цьому зростання щільності прихованої енергії пов'язане з пошкодженням

матеріалу і, як наслідок, зміцненням ПШ, а її зниження спричинене динамічним поверненням (розміцненням) внаслідок теплового ефекту пластичної деформації q .

Тоді згідно з основним законом термодинаміки рівняння енергетичного балансу процесу ППД для одиничного локального об'єму ПШ має вигляд:

$$A_{nl} = \Delta E_{np} + q.$$

Експериментально встановлено, що значна частина теплової енергії, пов'язана з тепловим ефектом процесу ППД, не затримується в деформованому елементі ПШ, а розсіюється по об'єму деталі, деформувальних тіл (іденторів) обробного інструменту або середовища і в навколишнє середовище за рахунок теплообміну q .

При цьому лише незначна частина цієї енергії затримується в деформованому елементі ПШ, підвищуючи його внутрішню енергію на величину E_m .

Таким чином, тепловий ефект пластичної деформації можна представити як:

$$q = \bar{q} + \Delta E_m.$$

Тоді рівняння енергетичного балансу процесу ППД має вигляд:

$$A_{nl} = \Delta E_{np} + q.$$

Накопичувана в деформованому елементі ПШ внутрішня енергія ΔE визначається сумою двох складових: потенційної (прихованої) ΔE_{np} і кінетичної (теплової) ΔE_m :

$$\Delta E = \Delta E_{np} + \Delta E_m.$$

Саме ця енергія пов'язана з пошкоджуваністю матеріалу ΔE_{np} і його термічним знеміцненням ΔE_m ; вона є відповідальною за міцнісні властивості ПШ, що формується в процесі ППД, і, отже, цілком обґрунтовано може бути прийнята за інтегральний показник пошкоджуваності елемента ПШ. Оскільки зміцненню ППД, як правило, піддаються деталі, які попередньо пройшли механічне оброблення, для оцінки й прогнозування міцнісних властивостей ПШ необхідно враховувати внутрішню енергію $E_{вн}$, накопичену в деформованому елементі на попередніх ППД етапах оброблення.

У загальному вигляді енергетичний стан деформованого в процесі ППД елемента можна описати рівнянням:

$$E = E_{вн} + \Delta E.$$

Відповідно до кінетичних уявлень процесу ППД поверхневий шар вважається максимально ефективно зміцненим, коли внутрішня енергія в деформованих елементах, що знаходяться на поверхні ПШ, досягне граничної (критичної) величини.

Цей стан ПШ для конкретних умов процесу ППД характеризується фізико-механічними характеристиками, що забезпечують максимальне підвищення експлуатаційних властивостей деталей. Отже, граничну внутрішню енергію можна прийняти як критерій зміцнення, а енергетичну умову граничної деформованості ПШ можна записати у вигляді:

$$E = \Delta E_{вн} + \sum_{i=1}^N \Delta E_i = E^*,$$

де $E_{вн}$ - внутрішня енергія в локальному макрооб'ємі ПШ у вихідному (до ППД) стані, що враховує спадкові властивості матеріалу при глибині його залягання $h = 0$;

ΔE_i - зміна внутрішньої енергії в локальному макрооб'ємі в процесі ППД.

Для кількісної оцінки граничної внутрішньої енергії E^* , за якої в процесі ППД досягається максимальне з точки зору підвищення експлуатаційних властивостей зміцнення ПШ, можна скористатися аналогією між процесами поглинання енергії кристалічною решіткою під час механічного навантаження при нагріванні.

І в тому, і в іншому випадку порушення міжатомних зв'язків настає в результаті поглинання граничної для даної кристалічної решітки величини енергії. У разі нагрівання металу від заданої температури T_0 до температури плавлення $T_{пл}$ граничну

питому енергію визначаємо за формулою:

$$E_{\text{пит}} = \int_{T_o}^{T_{пл}} c_p dT + q_{пл},$$

де c_p - питома теплоємність; $q_{пл}$ - прихована теплота плавлення.

Величина $\int_{T_o}^{T_{пл}} c_p dT$ характеризує зміну кількості теплоти металу при нагріванні

від заданої температури до температури плавлення; яка витрачається на збудження атомних коливань критичної величини без порушення міжатомних зв'язків. Ці порушення виникають, коли кристалічна решітка поглинає додаткову енергію, що дорівнює прихованій теплоті плавлення. При механічному навантаженні, як і при плавленні, процесу порушення міжатомних зв'язків передують спотворення кристалічної решітки до критичної величини з тією лише відмінністю, що при механічному навантаженні це зумовлюється досягненням у деформованих локальних об'ємах ПШ критичної щільності дислокацій, за якої подальше поглинання енергії кристалічною решіткою призводить до порушення міжатомних зв'язків.

Якщо прийняти, що питома енергія, що витрачається на граничне спотворення кристалічної решітки, не залежить від виду енергії, що підводиться (теплова або механічна), то гранична питома енергія, яку здатна поглинути кристалічна решітка, повинна відповідати тепловмісту (ентальпії) металу. З цього випливає, що критична внутрішня енергія E^* , що накопичується в деформованому елементі ПШ після ППД, кількісно може бути оцінена за допомогою термодинамічної константи - ентальпії металу в твердому стані H при температурі плавлення:

$$E^* = \int_{T_o}^{T_{пл}} c_p dT = H.$$

Використовуючи вищенаведену аналогію, рівняння енергетичного балансу процесу ППД можна представити у вигляді:

$$A_{пл} = (P_i, t_i, i) = (1+k_{md}) \Delta H,$$

де $k_{md} > 1$ - коефіцієнт, що враховує значення теплової енергії пластичної деформації, яка не затримується в деформованому елементі ПШ;
 $\Delta H = H - E_{en}$ - зміна ентальпії металу в процесі ППД.

Однак слід зазначити, що подібна аналогія стосується лише локальних об'ємів металу. Її перенесення на рівень великих об'ємів неправомірно, оскільки в процесі нагрівання енергія поглинається кристалічною решіткою практично рівномірно по всьому об'єму металу, а під час пластичної деформації внаслідок анізотропії й недосконалості кристалічної решітки відбувається неоднорідне поглинання енергії.

Отримане в результаті енергетичного аналізу процесу ППД рівняння є критеріальним, оскільки дає змогу обґрунтувати як технологічні параметри реалізації процесу, так і фізико-механічні характеристики ПШ, сформованого в результаті зміцнення динамічними методами ППД.

Перелік посилань

1. Данильченко Л.М., Радик Д.Л. Дослідження методів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням / Збірник тез доповідей XX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя 17-18 травня 2017 р. - Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С.21.