

УДК 621.941

О.М. Пилипенко, к.т.н., доц.
Черкаський державний технологічний університет
В.В. Власюк, гол. інж.
Черкаський науково-виробничий комплекс "Фотоприлад"

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПОГЛЯДІВ НА ПРИРОДУ РІЗАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Неоднорідність структури важкооброблюваних металів і сплавів є причиною появи автоколивального процесу при їх обробці. В статті представлено огляд сучасних уявлень про причини поганої оброблюваності легованих сплавів. Як енергетичну активацію процесу різання обгрунтовано і запропоновано метод комбінованої обробки з ультразвуковими коливаннями.

Постановка проблеми в загальному вигляді

Поняття оброблюваності конструкційних матеріалів охоплює сукупність їх технологічних властивостей, які впливають на різні характеристики передавальної функції процесу різання. До таких характеристик можна віднести: сили і потужність різання, деформацію і механізм стружкоутворення, умови забезпечення якості поверхневого шару і т.ін. [1]. Оброблюваність матеріалів повинна бути пов'язана з хімічним складом, мікроструктурою, механічними характеристиками, теплопровідністю, електропровідністю і рядом інших властивостей. Незважаючи на великий обсяг дослідницьких робіт в напрямку вивчення основних закономірностей оброблюваності металів, до теперішнього часу не знайдена така узагальнена фізична чи механічна їх характеристика, яка б визначала оброблюваність. Існуючі у виробництві експрес-методи для визначення оброблюваності не завжди є зручними і прийнятними. Крім того, уточнення фізичної природи оброблюваності дозволило б створити метали, які мають високу міцність і добру оброблюваність. В нормативних довідниках оброблюваність оцінюється інтенсивністю затуплення різального леза і рівнем доцільних швидкостей різання.

Тому проблема підвищення оброблюваності великого класу конструкційних матеріалів залишається актуальною на сучасному етапі машинобудівного виробництва.

Аналіз існуючих робіт, на які опираються автори

Виходячи з концепції О.М. Розенберга [2], в основі різання металів лежать процеси пластичної деформації і тертя. Тому важкооброблюваність великої групи жароміцних, корозійностійких сталей, титанових сплавів, газотермічних покриттів та інших конструкційних матеріалів пояснюється високою їх пластичністю і великою схильністю до зміцнення в результаті пластичної деформації при різанні. Такі матеріали також здатні зберігати міцність і твердість при підвищенні температури.

Досвід машинобудування свідчить про те, що залежно від основної структури, яка отримана при охолодженні на повітрі після високотемпературного нагріву важкооброблювані сталі можна розділити на 7 класів [3]:

- хромисті сталі з мартенситним перетворенням (20X13, 40X13, 20X17H2);
- хромисті сталі з частковим фазовим перетворенням мартенситно-феритного класу (12X13, 14X17H2);
- хромисті сталі без фазового перетворення феритного класу (12X17, 08X17T, 15X25T, 15X28T);
- високоміцні хромонікелеві та хромомарганцевонікелеві сталі аустенітно-мартенситного класу (20X13H4Г9);
- високоміцні хромонікелеві та хромомарганцевонікелеві сталі аустенітно-феритного класу (12X21H5T);
- хромонікелеві сталі аустенітного класу (12X18H10T);
- корозійностійкі сталі на залізонікелевій і нікелевій основах (03X1128МДТ).

Зазначені сталі мають низьку теплопровідність і високу чутливість до дії термосилових факторів при різанні. Причиною цього є їх напружений стан через складність кристалічної

побудови і характер міжатомних зв'язків. Нерівномірність мікротвердості призводить до нестабільності пластичної деформації і, як наслідок, – до зміни опору різанню та появи автоколивань.

Аналогічна картина спостерігається в процесах різання титанових сплавів. Але на відміну від високоміцних легованих сталей важкооброблюваність у цьому випадку пояснюється як нестабільністю твердості ($HB\ 100 \div 225$) через концентрацію домішків, так і особливостями фазового переходу $\alpha \rightarrow \beta$, який здійснюється при температурі 882 °С. Поліморфізм сплавів титану змінює їх фізико-механічні властивості саме в тому температурному діапазоні, який пригтаманний оптимальній швидкості різання сплавів твердосплавним інструментом.

При лезовому різанні газотермічних покриттів до проблем, що пов'язані з нерівномірною мікротвердістю, додаються ще проблеми, що пов'язані з особливостями структурної побудови (поруватість, технологічно-спадкоємні внутрішні залишкові напруження, незначна адгезійно-когезійна міцність) [4]. Субмікроефекти структури напилованих частинок, мікро- і макроефекти міжчастинкової зони також суттєво ускладнюють оброблюваність покриттів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Пошуки ефективних технологій механічної обробки важкооброблюваних матеріалів можуть здійснюватись тільки на основі детального аналізу причин, що обумовлюють погіршення умов пружнопластичної деформації мікрооб'єктів матеріалу і подальшого стружкоутворення. Необхідно провести аналітичний огляд існуючих досліджень і публікацій, в яких розглядаються теоретичні основи та фізична природа руйнації гетерогенних конструкційних матеріалів.

Спроби безпосередньо використати результати механіки руйнування для пояснення мікрофізичних процесів в об'ємі важкооброблюваного сплаву чи покриття не дали задовільних рішень [4, 5]. Тому для коректного пояснення фізичних моделей руйнації таких матеріалів при стружкоутворенні необхідно додатково залучати відомі схеми на рівні атомної взаємодії. Оскільки рушійним елементом пластичної деформації є дислокація, то на відміну від феноменологічного підходу дислокаційна теорія характеризує атомну природу пластичної деформації і в порівнянні з вакансіями та впровадженими атомами саме дислокації займають у цьому процесі лідируючу позицію. За Мак-Липом вклад дислокацій, вакансій і впроваджених атомів у пластичну деформацію характеризується співвідношенням 4 : 2,5 : 1.

Мета роботи

Враховуючи вищенаведене, метою роботи є аналіз сучасних поглядів на фізичну природу руйнації важкооброблюваних матеріалів і формулювання на цій базі основних напрямків теоретичних і експериментальних досліджень для інтенсифікації процесів різання та підвищення якості обробки.

Основна частина роботи

В умовах “статичного” традиційного різання при незмінних режимах обробки матеріал сприймає зовнішнє навантаження, і першими починають рухатись дислокації тієї системи сковзання, в якій дотичні напруження є максимальними. Величина пластичного зсуву під впливом навантаження визначиться за формулою:

$$\varepsilon = \rho \cdot v \cdot \ell \quad (1)$$

де ρ – щільність дислокацій; v – вектор Бюргерса; ℓ – довжина вільного пробігу дислокацій.

Структура більшості важкооброблюваних сплавів на основі заліза або титану сприяє концентрації дислокацій біля численних нуль- і одномірних дефектів (атоми легуючих елементів, домішкові атоми). Чим вищий параметр ρ , тим нижча енергія зародження нових дислокацій. В роботі [6] підкреслюється, що при збільшенні ρ з 10^6 до 10^{12} см⁻² енергія зародження нових дислокацій зменшується в три рази. Згідно з теорією Ломера і Котрелла при взаємодії дислокацій, що рухаються в площинах сковзання і перетинаються, можуть створюватись “сидячі” дислокації, які є теж додатковим бар'єром для накопичення рухомих дислокацій. Єдиний варіант стабілізації структури важкооброблюваних матеріалів при різанні – енергетична активація дислокацій тепловою або акустичною енергією. Поглинання акустичної

енергії ультразвукових (УЗ) коливань в зонах накопичення дислокацій призводить до зняття локальних внутрішніх напружень, розблокування дислокацій і збільшення їх рухливості. Загальний рівень напружень і сил при різанні буде зменшуватись і визначатиметься за формулою:

$$\sigma = \frac{G \cdot v}{k} \sqrt{\rho}, \quad (2)$$

де G – модуль зсуву; $k = 5 \div 7$ – числовий множник, який залежить від потужності акустичного опромінення.

Легуючі елементи або домішкові атоми у важкооброблюваних сплавах спотворюють кристалічну ґратку матричного матеріалу і гальмують рух близьколежачих дислокацій. Напруження, що активізують рух дислокацій при пластичній деформації, будуть зростати і визначатимуться так:

$$\sigma_n = \frac{1}{2} G \cdot \varepsilon^{4/3} \cdot C \sqrt{\frac{C^{1/2} \cdot \ln 4C}{\alpha}}, \quad (3)$$

де ε – відносна різниця радіусів атомів легуючих, домішкових елементів і матриці; C – концентрація атомів легуючих і домішкових елементів; α – коефіцієнт геометричного спотворення кристалічної ґратки матриці для різних типів дислокацій (для гвинтвної $\alpha = 1$, а для крайової $\alpha = 3/2$ [7]).

Енергетична активація дислокацій спонукає їх до активної взаємодії з атомами легуючих елементів за двома механізмами: а) пружним (ефект Котрелла); б) електронним (ефект Сузукі). Рівень активації обумовлює швидкість руху дислокацій і можливість перерізання легуючих кластерів, якщо дійсні напруження з боку таких дислокацій будуть перевищувати міцність кластерів. В протилежному випадку дислокації будуть огинати кластери з утворенням дислокаційних петель за механізмом Орована [8] (рис. 1, а).

При “статичному” різанні умовна площина зсуву може проходити через окремі зерна важкооброблюваного сплаву, і під дією напруження дислокації будуть накопичуватись біля бар’єрів – границь зерен (рис. 1, б). Вихід дислокацій в інше зерно є малоімовірним, оскільки існує дуже високий ступінь неспівпадання площин сковазання в сусідніх зернах. Пластична деформація, або проходження дислокації через зерно і його границю, може здійснюватись шляхом генерації нових дислокацій в об’ємах на іншій стороні границі зерна.

Розмір окремих зерен важкооброблюваного сплаву безпосередньо впливає на його пластичність, змінюючи межу плинності $[\sigma_m]$ за залежністю Холла-Петча [8]. При збільшенні напруження зсуву (варіант “статичного” різання) спостерігається накопичення дислокацій в загальній площині сковазання $y=0$, яке притиснуто напруженням τ до границі зерна. Важливим є врахування структури ядра авангардної дислокації. В сплавах з ОЦК-ґраткою, якими є більшість високолегованих сплавів на основі заліза (сплави 1–5 груп вищезгаданої класифікації) і сплави титану з β -стабілізаторами, ядра дислокацій деяких кристалографічних напрямків розкриваються переважно в площині, нормальній до площини сковазання. Зародкова мікротріщина в ядрі дислокації буде мати клиноподібну форму (рис. 1, б).

Сумарний вектор Бюргера накопичених дислокацій $B = n \cdot v_i$, де n – кількість накопичених дислокацій; v_i – вектор Бюргера i -ї дислокації. Береги мікротріщини взаємодіють між собою у пружному континуумі, та інтенсивність такої взаємодії може описуватись формулою $\ell_n = f(m_n)$, де умовою розкриття ядра авангардної дислокації буде:

$$m_n(y) = \int_0^y \eta_n(y) dy. \quad (4)$$

Отже, для зародження мікротріщини як початкового етапу стружкоутворення необхідно мати достатню кількість стиснутих дислокацій в кінці полоси сковазання. Згідно з дослідженнями Т.Екоборі [6] для металів така кількість становить близько 300 дислокацій. Нормальні до берегів мікротріщини напруження σ_n мають найбільшу величину на площиннах границі зерна, які розташовані відносно лощини сковазання під кутом 70° (рис. 1, б).

Генерація достатньої для утворення мікротріщини кількості дислокацій в умовах “статичного” різання вимагає значних напружень і відповідних енергетичних витрат. Опір різанню і сили стружкоутворення великі.

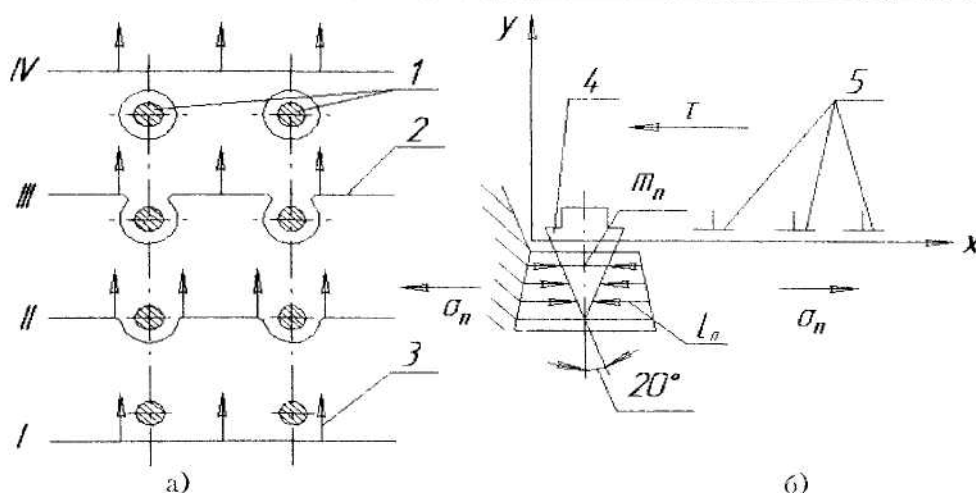


Рис. 1. Схема руху і накопичення дислокацій:
 а) рух дислокацій при огинанні кластерів; б) накопичення дислокацій біля бар'єрів.
 1 – легуючі кластери; 2 – дислокаційна лінія; 3 – напруження в матеріалі;
 4 – авангардна дислокація; 5 – дислокації накопичення

Інтенсифікація процесу різання важкооброблюваних сплавів можлива при забезпеченні двох умов: а) підвищення потужності дислокаційних накопичень біля структурних бар'єрів; б) генерація більшої кількості дислокацій (збільшення джерел Франка-Ріда). Обидві умови можуть бути виконані при акустичній активації прирізцевого шару оброблюваного матеріалу, який перетворюється у стружку. Аналогічний характер впливу на статичну межу плинності має і теплова активація, але для досягнення одного і того ж ефекту ультразвукової (акустичної) енергії вимагається значно менше ніж теплової. Так, для досягнення нульової статичної межі плинності в алюмінію потрібна щільність теплової енергії приблизно 10^{22} ев/см³, а при акустичній активації аналогічний ефект спостерігається при щільності акустичної енергії 10^{15} ев/см³. Пояснюється це тим, що УЗ-коливання поглинаються в тих місцях кристалічної ґратки, які є носіями механізму пластичної деформації – дислокаціями і границями зерен, і майже не поглинаються у вільних від дефектів зонах кристалів [9].

Механічна обробка конструктивних матеріалів традиційними методами (“статичне” різання) завжди характеризується коливанням рівнодіючої сили різання відносно якогось середнього значення, яке відповідає фіксованим режимам обробки і геометричним параметрам різального леза. В реальних умовах різання важкооброблюваних сплавів можна спостерігати роботу динамічної технологічної системи, коли під впливом збурюючих факторів внутрішньої і зовнішньої природи пружні коливання мають нерегулярний характер, а частота і амплітуда таких коливань змінюються в широкому діапазоні. Наслідком хаотичного руху різального леза інструмента є нерівномірність товщини зрізу стружки, кроку зсуву, зони пластичної і пружної деформації 2 (рис. 2), довжини контакту задньої поверхні інструмента (ЗПІ) з поверхнею різання 1. Величина останнього параметра є відповідальною за формоутворення нерівностей h_1 , які можна розрахувати за формулою:

$$h_1 = \ell \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

Накладання УЗ-коливань на процес різання при умові перевищення швидкості коливань над швидкістю різання ($V_p < 2\pi fA$) створює можливість регулярних коливань різального леза і зменшує сили його притискання до оброблюваної заготовки. Реакція технологічної системи на збурюючі фактори буде демпфуватись елементами інструментального блока та верстатного пристрою.

Пробний експеримент з перевірки ефективності комбінованого методу різання

Варіантом промислової реалізації комбінованого методу обробки важкооброблюваних сплавів може бути схема нарізання глухих нарізей в хромонікелевих сталях аустенітного класу типу 12X18H10T (рис. 3).

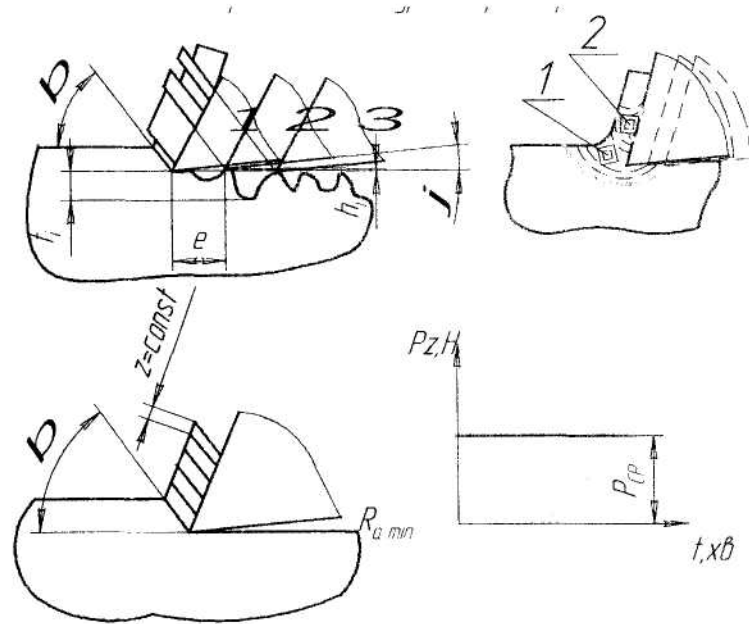


Рис. 2. Трибологічні збурюючі фактори
 1, 2, 3 – зміщення різця під впливом випадкових збурсень;
 1 – зона пластичної деформації; 2 – зона пружної деформації

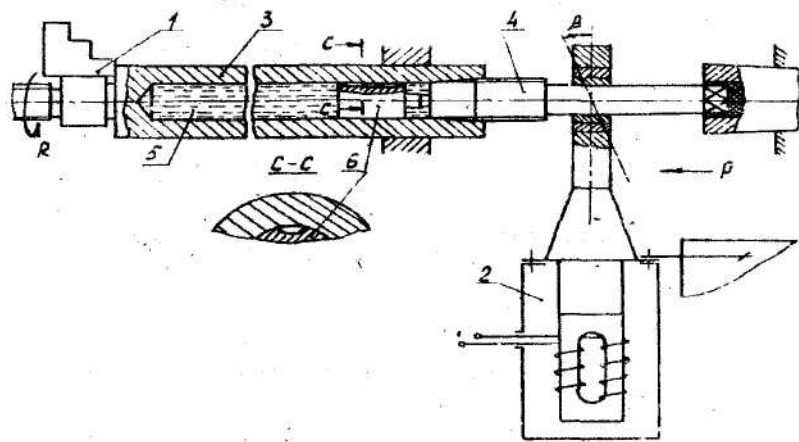


Рис. 3. Ультразвукова установка нарізання нарізів у глухих отворах

Формування нарізів в глухих отворах малого діаметра в згаданих сталях здійснюється зазвичай вручну комплектом метчиків і супроводжується частою поломкою інструмента з поганою якістю обробки. З метою усунення цих недоліків у зону різання вводяться УЗ-коливання. Комбінована обробка здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті 1 моделі 16К20 з люнетом і динамометричною оправкою, ультразвуковим вібратором 2 з напівхвильовим концентратором і сферовипромінювачем, заготовкою 3 і метчиком 4.

Сферовипромінювач дозволяє змінювати кут акустичного опромінення метчика поздовжньою ультразвуковою хвилею в межах $\beta = 0^\circ - 50^\circ$ [10]. При цьому забезпечується УЗ-коливання в поперечному і осьовому напрямках з частотою 20кГц і амплітудою 10 ± 12 мкм. Комбінована обробка нарізу М14×1,5 здійснювалась в середовищі МОР, для чого порожнина заготовки перед нарізкою нарізу заповнювалась олеїною кислотою 5. Поршень 6 забезпечував примусове дозування МОР в зону різання.

Метод комбінованого формування нарізу забезпечує, у порівнянні з ручним методом, підвищення продуктивності праці в 6 разів, необхідну якість поверхневого шару ($Ra 1,25$) і збереження неушкодженості інструмента.

Висновки та перспективи розвитку напрямку

Особливості структури важкооброблюваних сплавів негативно впливають на їх оброблюваність, що призводить до появи автоколивань і суттєвого погіршення якості поверхневого шару. З метою стабілізації процесу і його інтенсифікації необхідно вводити в зону стружкоутворення примусові УЗ-коливання. Дислокаційні поглинання УЗ-коливань підвищать межу плинності важкооброблюваних сплавів і знизять рівень їх ушкоджуваності. Практична реалізація комбінованого методу обробки може здійснюватись на прикладі нарізки нарізу в глухих отворах в аустенітній хромонікелевій сталі 12X18H10T та в інших матеріалах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ящерицын П.И. и др. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов. – Мн.: Высш. шк., 1990. – 512.
2. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М.: Машигиз – 1956. – 260 с.
3. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. – 1986. – 184 с.
4. Пилипенко О.М. Вібраційна обробка газотермічних покриттів. – Черкаси: Сіяч, 2000. – 208 с.
5. Подстригач Я.С., Шевчук П.Р., Иващук Д.Е. Исследование напряженного состояния материала при диффузионном насыщении цилиндра с тонким покрытием // Проблемы прочности. – 1974. – №2. – С. 169–171.
6. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения металлов: Пер. с японск. – К.: Паук. Думка, 1978. – 364 с.
7. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение. – 1979. – 320 с.
8. Иванова В.С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
9. Herth S.P., Louthe G.A. Theory of Dislocations Mc Graw Hill. – London. – 1980. – 240 p.
10. Северденко А.В., Клубович В.В., Степанко А.В. Ультразвуки пластичность. Минск: Наука и техника, 1976. – 448 с.

ШИЛИПЕНКО Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих технологій машинобудування Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- механічна обробка газотермічних покриттів;
- комбіновані методи різання важкооброблюваних матеріалів.

ВЛАСЮК Володимир Васильович – головний інженер науково-виробничого комплексу “Фотоприлад”, м. Черкаси.

Наукові інтереси:

- механічна обробка важкооброблюваних конструкційних матеріалів.