



Паладійчук Ю. Б.
к.т.н., доцент

Телятник І. А.
аспірантка

*Вінницький національний
аграрний університет*

Paladiychuk Yu.
Ph.D. of Engineering, Associate
Professor

Telyatnik I.
postgraduate student

*Vinnitsia National Agrarian
University*

УДК 621.785.534.4
DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-9

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ЦИКЛУ НА ПОВЕРХНІ ЗАГОТОВКИ ВНАСЛІДОК ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

При постійному вдосконаленні металургійних характеристик оброблених поверхонь, все ще бракує розуміння щодо термічних умов, в яких ці поверхні знаходяться в процесі взаємодії заготовки та бічної поверхні. Під час обробки високовуглецевих сплавів дуже мало відомо про зміни температури у внутрішньому об'ємі обробленої деталі, де матеріал заготовки взаємодіє з ріжучим краєм інструменту.

У цій роботі були вивчені характеристики теплового поля та результуючої металургії поверхні, викликані у високовуглецевих сплавах для сценаріїв різання, що включають різні комбінації термомеханічних граничних умов.

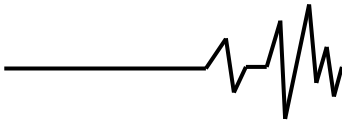
Аналіз розвитку теплового поля на поверхні заготовки дозволив виявити швидкості нагрівання та охолодження, викликані різанням, дозволивши описати два різних типи теплового циклу, зі структурою Нагрівання-Пік-Охолодження і Нагрівання-Квазіізотермічна Деформація-Охолодження залежно від агресивності процесу. Встановлено, що підповерхнева теплова зона пов'язана з деформацією, спричиненою різанням, оскільки вона поєднує інформацію про величину теплового поля та швидкості процесу. Виявлено, що найвища швидкість утворення тепла, спричинена пластичною деформацією, відбувалася в тонких поверхневих шарах на початку контакту заготовки та бокової поверхні, що було пов'язано з умовами, за яких генеруються білі шари.

Аналіз енергетичного балансу вказав на розвиток менш сильного та менш імпульсивного процесу деформації на більших глибинах під поверхнею, який був пов'язаний із механізмом формування шарів опору матеріалу. Таким чином, термічний вплив на опрацьовані поверхні був взаємопов'язаний з їхньою кінцевою металургійною структурою, що дало змогу глибоко осмислити фізичні умови, що виникають при різанні високовуглецевих сплавів.

Ключові слова. Пластична деформація, високовуглецеві сплави, різання, тепловий цикл, заготовка, механічна обробка.

Вступ. Розуміння механізмів мікроструктурної модифікації, спричиненої процесами механічної обробки високовуглецевих сплавів, є фундаментальною темою дослідження, яка має велике значення як з академічної, так і з промислової точки зору. Насправді, значний дослідницький інтерес викликають механізми, що керують миттєвою мікроструктурною зміною, яка може бути викликана на обробленій поверхні під час її взаємодії з ріжучою пластиною [1].

Оскільки цілісність поверхні, спричинена механічною обробкою, може відігравати вирішальну роль у визначенні здатності матеріалу витримувати умови навантаження під час експлуатації, його розуміння особливо актуальне з точки зору промисловості у виробництві компонентів високої вартості в таких галузях, як аерокосмічна, ядерна чи автомобільна [1]. Попри те, що у минулому акцент у дослідженнях був зроблений на ролі теплових та механічних впливів



на утворення аномалій на поверхні, які виникають внаслідок механічної обробки, подальший аналіз літератури доводить, що, незважаючи на її ключову роль у поясненні механізмів мікроструктурної деформації при механічній обробці, вивчення термічної історії опрацьованих поверхонь є темою, яка залишається на великому рівні невивченою. В момент формування стружки інтенсивна деформація матеріалу одночасно відбувається в трьох різних областях, прилеглих до заготовки інструменту [1].

Границя ділянки, де висока температура та деформація швидко розгортаються в локальних умовах з надзвичайною швидкістю поділяються на [1,2]:

- первинну зону зсуву, яка з складається з об'ємів металу, що швидко зсувається, що переходить від матеріалу заготовки до формування стружки;
- вторинну зону зсуву, яка з розвивається через тертя в області контакту інструмента та стружки;
- третинну зону зсуву, де відбувається пластична деформація внаслідок інтерференції нової (обробленої) поверхні заготовки з боковою стороною інструменту.

Теплоутворення при різанні, температурні поля, що розвиваються в первинній зоні зсуву і вторинній зоні зсуву, були об'єктом численних досліджень протягом останніх років, причому сучасні дослідження в даний час зосереджені на дослідженні явищ теплопередачі в цих двох зонах зсуву та визначення основних параметрів для їх термічного аналізу. Проте, велика кількість наукових досліджень, спрямованих на вивчення теплового поля, що виникає під час різання, малоімовірно може розкрити явища, які спостерігаються в третинній зоні зсуву, іншими словами, на граничній лінії бічної частини заготовки.

Дослідження формування термічного контактного опору при різанні за допомогою високошвидкісного теплового зображення та скануючої електронної мікроскопії, підкреслюючи його вплив на теплопровідність на межі інструмент-заготовка [2].

Хоча було проведено ряд досліджень, що аналізують температуру поверхні під час різання, все ж є значний пробіл в знаннях стосовно взаємозв'язку цієї поверхневої температури з мікроструктурним станом, викликаним механічною обробкою. Фокусуючись на сплавах Cu, Fe та Al, була розроблена вдосконалена модель джерела тепла з метою опису еволюції температури обробленої поверхні під час різання, включаючи вплив швидкостей нагрівання та охолодження [2]. Досліджування зміни температури під час жорсткого точіння загартованих сталей, показуючи, як пік температури на обробленій поверхні досягається на її перетині з ріжучою

кромкою, і представляючи два експериментальних підходи до вимірювання температури поверхні. Однак невідомо, як досліджувані теплові явища пов'язані зі станом обробленої поверхні.

Використання інфрачервоного температурного вимірювання для аналізу теплового передавання, яке відбувається в заготовці під час свердління матеріалу інварного типу (матеріал 36Н (Ni – 35-37%), розкриває його змінливість в умовах як сухого, так і вологого середовища. Однак дотепер не проведено досліджень, які б розкрили зв'язок між температурою поверхні в третинній зоні зсуву та металургічним станом, що виникає внаслідок цього процесу.

Вищезазначений брак інформації про еволюцію теплового поля в третинній зоні зсуву у зв'язку з деформацією під поверхню, спричиненою механічною обробкою, здається значним обмеженням і різко контрастує з чудовим прогресом у дослідженні дрібномасштабних металургічних особливостей оброблених поверхонь. Фактично, коли збереження металургічної цілісності поверхні стає вирішальним фактором для забезпечення продуктивності деталей, необхідно детально проаналізувати наявні мікроструктурні зміни, обумовлені механічною обробкою [2,3].

Дослідження вразливості високовуглецевих сплавів за умов агресивного свердління має на меті глибокий аналіз металургічних характеристик нанорозмірних властивостей шарів, що піддаються значній пластичній деформації під час механічної обробки. Незважаючи на те, що у цій роботі запропоновано температурну інтерпретацію формування шару пластичної деформації, базовану на моделюванні кінцевих елементів для визначення характерних температур різання, залишається невирішеним питання щодо теплових виділень під поверхнею заготовки в процесі пластичної деформації [2,3].

Зв'язок між тепловими полями та мікроструктурною деформацією при механічній обробці розглядався для випадку первинної зони зсуву та вторинної зони зсуву. Зосереджуючись на первинній зоні зсуву, термічний аналіз пластичної деформації при механічній обробці матеріалів стійких до втомлювального виду зношування (групи ШХ) з малими швидкостями деформації показав аналогію між температурним полем, вимірним інфрачервоним зображенням, і розподілом швидкості деформації, вимірним за допомогою вимірювання швидкості зображення частинок [3]. Аналіз термічного поля вторинної зони зсуву дозволив дослідити роль динамічної рекристалізації на механіку різання сталі ШХ 15, підкресливши мікроструктурні характеристики режимів різання, що демонструють утворення нарощених країв [3-5].



При різанні високовуглецевих сталей було встановлено зв'язок між термічним управлінням, оброблюваністю та цілісністю поверхні, повідомляючи про вплив первинної гамма-фази на реакцію зміцнення або розм'якшення сплаву під час різання [3-5]. Однак природа теплових полів, які виникають під час зсуву підповерхні заготовки в третинній зоні зсуву, не дуже добре вивчена, незважаючи на його ключовий зв'язок із мікроструктурною деформацією та результируючою цілісністю мікроструктурної поверхні.

Усунення існуючих розривів у термічних механізмах мікроструктурної деформації поверхні при механічній обробці набуває ще більшої ролі, коли мова йде про різання високотемпературних сплавів з низькою оброблюваністю та високими функціональними вимогами [3-5].

Завдяки унікальному поєднанню високотемпературної міцності та суворих вимог до якості, обробка високовуглецеві сплави забезпечують високий рівень складності в усіх аспектах різання металу. Незважаючи на те, що знання про мікроструктурну цілісність поверхні, викликану механічним видаленням матеріалу, накопичуються швидко, повного розуміння металургії механічної поверхні неможливо досягти без глибокого розуміння її термічної історії.

У цьому контексті дане дослідження має на меті подолати існуючі прогалини досліджуючи термічну історію матеріалу, що піддається пластичній деформації в зоні третинного зсуву, і його зв'язок із мікроструктурною цілісністю поверхні заготовки, це дозволить описати термічні стадії модифікації поверхні, виявивши еволюцію температурного поля в процесі деформації поверхні, спричиненої механічною обробкою, і результат підповерхневих термічних циклів.

Відображення швидкості виділення тепла в зоні третинного зсуву дозволить обговорювати стадії підповерхневої пластичної деформації у зв'язку з мікроструктурною цілісністю поверхні заготовки [4].

Для виконання процесів механічної обробки необхідно створити пластичність матеріалу заготовки, який потрібно видалити та перетворити на стружку під дією ріжучої пластини. Однак через сили взаємодії, що розвиваються на межі між інструментом і деталлю, деформації також можуть бути викликані в об'ємі обробленої деталі, де можуть бути виявлені локальні мікроструктурні спотворення.

Мета дослідження. Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці

Аналіз останніх досліджень. Первинна зона зсуву пластичної деформації, що розвивається з високою швидкістю, перетворює шари сипучого матеріалу на закручену стружку, як представлено на рис. 1 а, в, генеруючи тепло та викликаючи високі температури перед різакком.

Кожна формована стружка залишає зону різання, сильно стираючись об граблі інструмента, у вторинній зоні зсуву виникає серйозна деформація зсуву. Одночасно деформація третинна зона зсуву відбувається в об'ємах заготовки, розташованих за ріжучою кромкою, де виникає тертя між обробленою поверхнею та боковою стороною інструменту через взаємодію інструмент-заготовка [4].

Металургійні модифікації обробленої підповерхні можуть миттєво виникнути в умовах високої температури. Як схематично представлено на рис. 1 в, г, шар опору матеріалу, що представляє зернисту структуру, може бути викликаний на невеликій глибині під обробленою поверхнею. Крім того, за найагресивніших сценаріїв може відбутися рекристалізація матеріалу з утворенням тонких нанокристалічних шарів, також відомих як білі шари, які можуть поширюватися на кілька мікрон нижче новозрізаної поверхні [4].

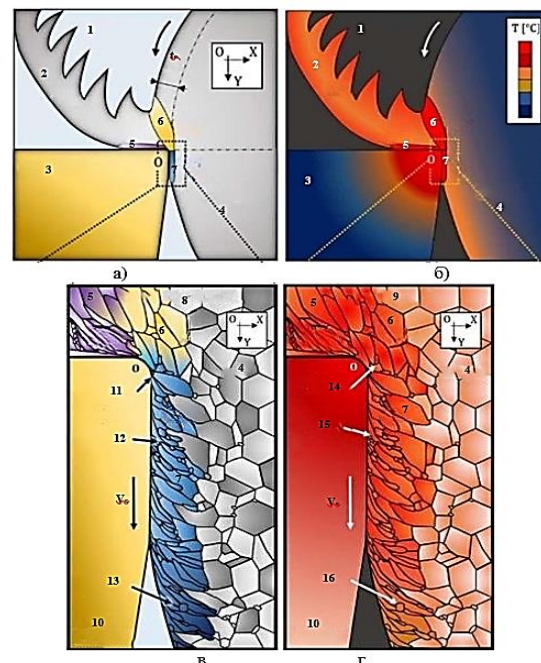
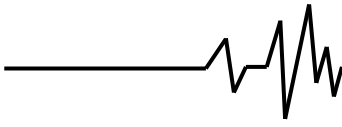


Рис. 1. Схематичне зображення термомеханічних умов при механічній обробці: а – механічні; б – термічні ефекти на межі розділу інструмент-заготовка; в – мікроструктурна деформація заготовки; г – розвиток теплового поля в зоні третинного зсуву вздовж довжини контакту бокової частини заготовки. 1 – Обертання шпинделя. 2 – Чіп. 3, 10 – Ріжуча вставка. 4 – Заготовка. 5 – Вторинна зона зсуву. 6 – Первинна зона зсуву. 7 – Третинна зона зсуву. 8 – Механічна перспектива. 9 – Теплова перспектива. 11 – Взаємодія фланг-заготовка. 12 – Поверхневе деформування в третинній зоні зсуву. 13 – Деформований шар матеріалу. 14 – Просочення гарячого металу в третинній зоні зсуву. 15 – Розсіювання тепла в третинній зоні зсуву. 16 – Поверхневе охолодження.



Однак опис спричинених механічною обробкою механічних або теплових полів сам по собі не може забезпечити повний опис механізму генерації таких мікроструктурно-деформованих шарів. Модифікація матеріалу, що відбувається в оброблених нижніх шарах, була пов'язана з екстремальними швидкостями деформації на межі між інструментом і заготовкою, які знаходяться в діапазоні 104-105°C [4,5].

Зусилля різання, як правило, можуть надати лише макроскопічні показники серйозності механічних полів під час обробки, які мають глобальний характер, оскільки вони враховують усі явища, що розвиваються на межі інструмента та деталі, наприклад, тертя стружки, деформацію первинної зони зсуву сили наростоутворення.

Величина температур обробки може надати інформацію про серйозність процесу різання, слід зауважити, що на них неминуче впливають граничні умови локальної теплопередачі:

- властивості ріжучої пластини;
- наявність охолоджуючої рідини;
- провідність заготовки.

Тому це не завжди може бути використано як критерій для порівняння різних сценаріїв різання, особливо в контексті деформації під поверхнею заготовки.

Створення механічних або термічних умов, при процесі різання, загалом недостатня для вирішення проблеми цілісності поверхні заготовки, оскільки вона не може повністю деталізувати умови, що розвиваються локально на межі між боковою стороною інструменту та поверхнею заготовки, що пластично деформується. Насправді однозначної відповідності загалом не існує між такими вимірюваннями теплових або механічних полів (наприклад, сили різання, температури різання або швидкості деформації) і процесом пластичної деформації, що відбувається в мікроструктурі заготовки. Натомість, енергетичний опис, що включає як інтенсивність теплових полів, що локально розвиваються в деформуючих підповерхневих об'ємах, так і швидкість, з якою такі еволюція може пов'язати ефект (швидкість утворення тепла та еволюцію теплового поля в третинній зоні зсуву) з його причиною (пластична деформація під поверхнею) [4,5]

Під час взаємодії поверхні заготовки з інструментом відбувається пластична деформація третинної зони зсуву, в результаті чого механічна енергія перетворюється на теплову. Ефективний характер цього процесу, фактично, репрезентується мікроструктурним станом заготовки, що визначає її цілісність поверхні. Тому може бути встановлений зв'язок між пластичною деформацією, яку досвідчує нижня поверхня обробленої деталі, і розподілом теплових полів, що виникають в об'ємі

обробленої деталі, зокрема в третинній зоні зсуву. Процес структуризації та перетворення об'євів матеріалу в шари заготовки, які піддаються механічній обробці, відбувається майже миттєво під час їх переходу через межу між інструментом і заготовкою, за умов, коли швидкість становить 60 м/хв, а відстань 0,1 мм перетинається за 10,2 с. (рис. 1в і г).

Металеві об'єми, що надходять у третинну зону зсуву, вже можуть мати високу температуру після взаємодії з тепловим полем, що поширюється перед різком. Коли нова поверхня просувається за ріжучу кромку, виникає високотемпературна деформація внаслідок її тертя об бічну частину інструменту (рис. 1 б) Це призводить до генерації тепла під час пластичної деформації (рис. 1г), що породжує температурні градієнти на поверхні заготовки (рис. 2). На кінцевому етапі, поза межами зони взаємодії бічної частини інструмента з деталлю, деформація під поверхнею перестає відбуватися (рис. 1 б і г), і термомеханічний шар на поверхні охолоджується під час віддалення від зони різання (рис. 2 а і б) [4-6].

Коли матеріал заготовки наближається до місця різання, тоді як охолодження має відбуватися, коли він віддаляється від цієї зони. Таким чином, безперервність теплових полів означає, що принаймні один пік температури повинен існувати вздовж довжини контакту заготовки та бокової поверхні, тобто між фазами нагрівання та охолодження. Крім того, найбільш суворі умови повинні виникати на невеликій глибині поверхні, тобто в областях, що проходять поблизу бокової поверхні інструменту, із зменшенням величини, що віддаляється від обробленої поверхні.

У підповерхневій поверхні заготовки, що проходить поблизу межі розділу інструмент-заготовка, виникають умови швидкого навантаження-розвантаження. З механічної точки зору, матеріал зрізається з високою швидкістю (рис. 1 в і г), тоді як з термічної точки зору нижня поверхня заготовки проходить миттєвий цикл нагрівання-охолодження (рис. 2 б і в). Теплові та механічні поля в третинній зоні зсуву насправді глибоко пов'язані, оскільки утворення тепла, викликане різанням, визначає форму теплових градієнтів, що розвиваються на поверхні заготовки, що у свою чергу, може впливати на високотемпературну реакцію об'євів матеріалу, що пластично деформуються [4-6].

Опис просторово-часової еволюції процесу пластичної деформації в третинній зоні зсуву може бути досягнутий за допомогою аналізу енергетичного балансу. насправді, утворення тепла, спричинене різанням, призводить до утворення високих температурних градієнтів, що викликає теплопровідність під поверхнею заготовки. Застосування рівнянь



створено декілька дисків для експериментів з ортогональним різанням, виконано з точністю $\pm 0,1$ після калібрування [4].

За таких умов похибка вимірювання зазвичай становить 5% [5]. Коли інфрачервона термографія використовується для різання металу, температура вимірюється на зовнішній стороні ширини контакту.

Щоб обмежити появу бічного потоку металу, був дозволений осьовий зазор 0,1 мм між бічними гранями інструмента та заготовки, як показано на рис. 3б. []. Це дозволило обмежити ефект бічного потоку, переконавшись, що його присутність не впливає на вибрані терморамми. Корекція теплових карт була застосована в постобробці для оцінки теплових умов, досягнутих у середніх зонах системи різання інструмент-заготовка, на основі попередніх досліджень тривимірного температурного поля при ортогональному різанні та його вимірності за допомогою інфрачервоної термографії [5].

Механізми формування цілісності поверхні при механічній обробці зумовлені поєднанням термічних і механічних ефектів, що розвиваються на межі розділу інструмент-заготовка.

Механічні впливи пов'язані з факторами, що визначають механічне втручання між ріжучим інструментом і заготовкою:

- глибина різання;
- радіус ріжучої кромки;
- знос бокової поверхні;
- передній кут;
- швидкість знімання матеріалу.

По-іншому, теплові ефекти пов'язані з тепловими умовами, за яких відбувається видалення матеріалу, а отже, і пластична деформація заготовки:

- температурне поле;
- температурні градієнти;
- швидкість нагріву та охолодження.

У рамках механічної обробки ці два ефекти зазвичай поєднуються, тобто механічна взаємодія між інструментом і заготовкою впливає на теплове поле на межі між інструментом і заготовкою [5].

Щоб створити різні рівні мікроструктурної деформації заготовки, параметри різання вибираються таким чином, щоб модулювати суворість термомеханічних умов, за яких виготовляються оброблені поверхні. Розглядаються два набори експериментів з різанням, які будуть називатися «звичайними» та «агресивними». «Звичайні» експерименти з різанням спрямовані на дослідження процесу деформації в третинній зоні зсуву, коли індукуються

обмежені кількості мікроструктурних аномалій і помірні температурні поля [5,6].

З іншого боку, експерименти з «агресивним» різанням мають на меті вивчити деформацію матеріалу в третинній зоні зсуву, коли при дуже високих температурах виробляються набагато більш високі рівні мікроструктурних модифікацій. Зокрема, в рамках дослідження деформації поверхні високовуглецевих сплавів, викликаної механічною обробкою, $>20\text{--}25$ мкм, наявність високоподрібнених зернистих шарів (утворення нанокристалічних шарів), велика глибина підповерхневої поверхні, на яку впливає залишкова напруга, і дуже високі температури різання (у діапазоні 103°C або вище). Тому «звичайні» експерименти з різанням виконуються зі вставками з радіусом гострої кромки ($r = 7$ мкм), бокові кромки які застосовувалися при помірних швидкостях поверхні $30\text{--}70$ м/хв і товщині нерозрізаної стружки 0,1 мм. Експерименти з «агресивним» різанням виконуються з початково зношеними інструментами із заокругленою ріжучою кромкою ($r = 30$ мкм), а також при вищих швидкостях поверхні $60\text{--}130$ м/хв і більшій товщині нерозрізаної стружки 0,15 мм [5].

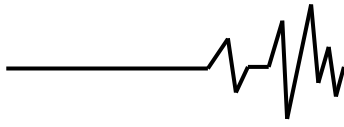
Через вищі швидкості видалення матеріалу, більший радіус інструменту та більший знос бокових сторін, очікується, що «агресивні» сценарії різання спричинять набагато більшу фрикційну взаємодію та пластичну деформацію інструмент-заготовка межі розділу, як це пізніше буде підтверджено значно вищими температурами різання, мікроструктурною деформацією та залишковою напругою, які вони викликали.

Набір експериментів для аналізу теплового поля та цілісності поверхні в агресивних і звичайних умовах різання.

Усі вставки мають нейтральний передній кут. У звичайних умовах використовуються гострі та бокові ріжучі кромки. Закруглені на спочатку зношені вставки використовувалися в агресивних сценаріях.

Тим не менш, очікується, що розвиток термомеханічних полів на межі заготовки інструменту за даного набору експериментальних умов також сильно залежатиме від термомеханічних характеристик ріжучої пластини (високотемпературної твердості, теплопровідності) [6].

Таким чином, для вивчення поведінки підповерхневих теплових полів і пов'язаних з ними механізмів деформації було розглянуто два ключові матеріали для вставок, тобто пластини різальної крайки з полікристалічного кубічного нітриду бору і цементованого карбїду з покриттям WC, TiC (марки P18, P6, M5). Оскільки марки полікристалічного кубічного



нітриду бору демонструють більшу твердість порівняно з марками цементованого карбіду (навіть за високих температур), вони розроблені, щоб витримувати більш високі швидкості різання, і, отже, очікується, що вони створюватимуть менш сильні теплові поля, навіть якщо викликають більш високі швидкості деформації поверхні заготовки [6].

Швидкість поверхні, прийняті під час звичайних та агресивних експериментів, були обрані відповідно до теплофізичних можливостей вставок. Слід зазначити, що механічні та термічні ефекти не «розділені» в цих експериментах, насправді вони є поєднаними ефектами, оскільки механічна обробка є термомеханічним процесом. Однак відмінності в умовах різання таких як термофізичні властивості інструменту, геометрія, товщина нерозрізаної стружки тощо, дозволили спланувати експерименти, де їх відносна вага відрізняється. Наприклад, різна трибологічна поведінка марок цементованого карбіду при низькій швидкості різання може викликати сильніший розвиток теплового поля на межі заготовки інструменту порівняно з полікристалічним кубічним нітридом бору, з подальшим впливом на цілісність поверхні [6].

Масова частка основної гамма-фази (рис. 4) є ключовою характеристикою високовуглецевих сплавів, оскільки вона надає високотемпературну міцність і визначає стійкість до втомного розтріскування. Цей сплав має гамма-основну вагову частку в діапазоні 51– 53%, що значно вище, ніж у інших передових сплавів, WC, TiC, номінальне значення яких знаходиться в діапазоні 45% [6,7]. Таким чином, високий вміст гамма-первинної фази з високою температурою розчинення $<1167^{\circ}\text{C}$ є одним із ключових аспектів, які створюють значні проблеми при виконанні операцій механічного різання цього матеріалу.

Вибір високовуглецевих сплавів забезпечує унікальний практичний приклад для вивчення раніше окресленої проблеми дослідження з наступних причин. По-перше, очікується, що його високотемпературна здатність генеруватиме дуже інтенсивні термомеханічні поля на поверхні заготовки інструменту, що дозволить вивчати та розуміти термічну історію деформації поверхні, коли процес різання наближається до поточних меж. Крім того, аналіз термічної історії пластичної деформації в цьому матеріалі сприятиме розкриттю природи фізичних умов, за яких шари опору матеріалу та нанокристалічні (білі) шари генеруються в основі [6].

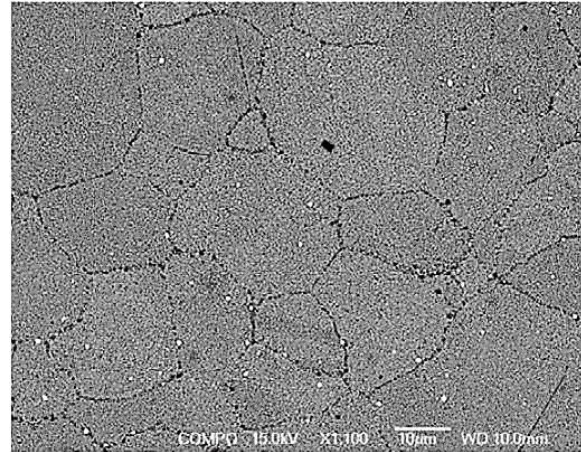


Рис. 4. Електронне зображення сканування, що демонструє репрезентативну мікроструктуру високовуглецевого сплаву в стані «як отримано». Зразок хімічно травилу реактивом Каллінга № 2.

Щоб зв'язати температурні умови, що розвиваються в об'ємі заготовки з точки зору теплового поля на межі інструмент-заготовка та підповерхневих термічних циклів із результуючою мікроструктурною цілісністю поверхні, металургійний аналіз спричинених механічною обробкою шарів поверхневою деформацією був проведений для кожного із досліджуваних сценаріїв. Для проведення мікроскопічного аналізу поперечні зрізи оброблених зразків були отримані шляхом поступового шліфування та полірування. Для виявлення мікроструктури сплаву було використано хімічне травлення за допомогою реактиву Каллінга № 2, що складається з 2% CuCl_2 в підкисленій спиртовій основі. Особливості підповерхневої мікроструктури спостерігали за допомогою скануючої електронної мікроскопії з польовою емісійною гарматою скануючого електронного мікроскопа Zeiss LeO Supra 35 [7].

Тип і ступінь мікроструктурної деформації, спричиненої процесом різання, буде пов'язано з інформацією, яку надають карти температурного поля, отримані за допомогою високошвидкісного тепловізора. Таким чином, контекстний аналіз підповерхневого стану заготовки буде пов'язаний з відповідним термічним розвитком на межі інструмент-заготовка та з результуючими підповерхневими термічними циклами, дозволяючи асоціювати утворення тепла в третинна зона зсуву з відповідним механізмом підповерхневої пластичної деформації. під час його взаємодії з боком інструменту.

Щоб вивчити термічну історію мікроструктурної деформації поверхні, буде вивчено аналіз різних комбінацій термічних і механічних впливів на цілісність отриманої поверхні, показуючи, що для розгляду стану деформації, викликаного підповерхневою



поверхнею заготовки, необхідний більш повний опис. Таким чином, термомеханічний опис процесу, при якому підповерхневі шари деформуються при різанні, буде забезпечено дослідженням підповерхневих теплових циклів і теплоутворення в третинній зоні зсуву [7-9].

Це дозволить зв'язати температурну історію, спричинену різанням, із механізмами утворення мікроструктурно деформованих шарів на поверхні заготовки в результаті механічної взаємодії інструмент-заготовка, спричиненої в зоні третинного зсуву.

Вплив термомеханічної конфігурації різання на розвиток теплового поля на межі інструмент-заготовка

Характеристики теплового поля на межі розділу інструмент-заготовка.

Аналіз фізичних умов, що розвиваються на контакті інструмент-деталь, є ключовим елементом для розуміння механізмів, що впливають на цілісність поверхні оброблених деталей. Репрезентативну температурну карту на межі інструмент-деталь можна спостерігати на рис. 5 а, де проміжна інтенсивність теплового поля була створена за допомогою вставки цементованого карбіду, що використовувалася при помірній швидкості поверхні.

Оскільки теплові карти відображають температури вище 300°C, об'єм заготовки далеко більш ніж ~ 250 мкм від межі різання, до правого верхнього та правого нижнього кутів на рис. 5а здається термічним напливом (темно-синій колір), тоді як у зоні контакту інструмента з деталлю, де утворюється стружка, можна спостерігати високотемпературні області [7].

На стику між мікросхемою, інструментом і деталлю буде зосереджено увагу, як показано на рис. 5б, де три зони, можна термічно визначити. Віяло похилих ізотермічних ліній можна спостерігати на межі між вхідним необрізаним матеріалом заготовки та ріжучою кромкою. У цій області високотемпературний граничний об'єм первинна зона зсуву розділяє заготовку та стружку (рис. 5б) підкреслює геометричну відповідність між областями локалізації деформації та формою температурного поля. Подібним чином, температурне поле може бути пов'язане з пластичною деформацією на межі розділу інструмент-стружка, де деформація стружки розвивається вторинна зона зсуву через тертя стружки, і, що найважливіше, у відповідності третинна зона зсуву, де оброблена поверхня механічно взаємодіє з боковою стороною інструменту.

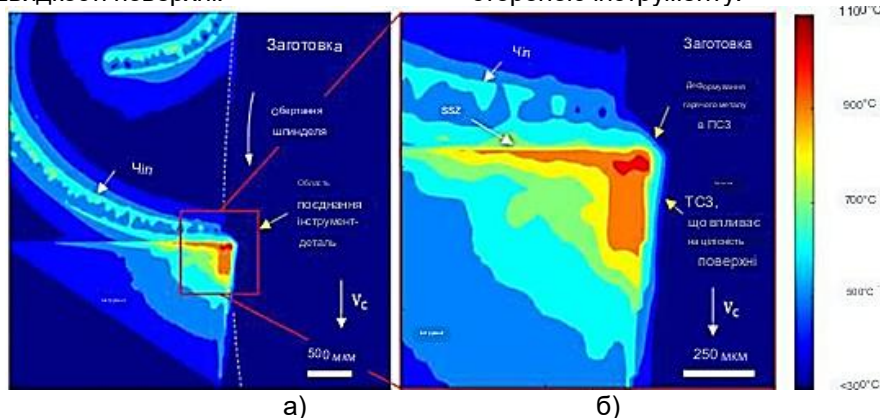


Рис. 5. Приклад карти температури поверхні розділу інструмент-заготовка при проміжній напруженості теплового поля: а – репрезентативні характеристики теплового поля, викликаного різанням, на межі розділу інструмент-деталь; б – більше зображення в області наконечника інструмента для ідентифікації зон зсуву металу, тобто первинна зона зсуву, вторинна зона зсуву і третинна зона зсуву.

При різанні пластинами з полікристалічного кубічного нітриду бору вища швидкість різання призвела до вищих показників деформації на межі контакту інструмент-заготовка, оскільки це можна якісно оцінити з більш виражених смуг зсуву, викликаних у процесі формування стружки (рис. 7). Таким чином, термічні та механічні умови, за яких генеруються нові оброблені поверхні в цих двох випадках, мають надзвичайно різні характеристики: у першому випадку поля більш високої температури були створені на межі

заготовки інструменту за допомогою цементованого карбіду за звичайних умов різання, навіть незважаючи на те, що процес деформації індукувався з меншими темпами (Рис. 6а і 7а).

Різання на вищих швидкостях із пластинами з полікристалічного кубічного нітриду бору викликало вищі швидкості деформації на межі розділу інструмент-заготовка, хоча й за більш м'яких температурних умов (рис. 6б і 7б) [7].

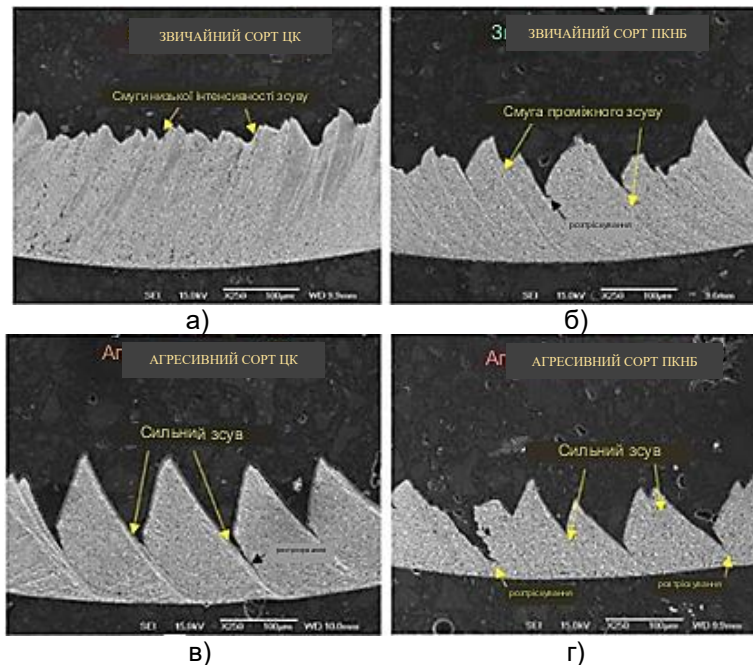
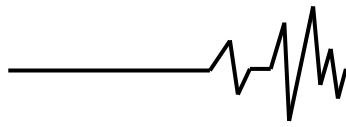


Рис. 6. Морфологія стружки, викликана під час різання високовуглицевих сплавів за різних комбінацій термічних і механічних впливів на межі заготовки інструменту: а – м'які смуги зсуву, спричинені поєднанням проміжних теплових впливів і механічних впливів низької інтенсивності; б – проміжні смуги зсуву, спричинені комбінацією теплових впливів низької інтенсивності та проміжних механічних впливів; в – сильні смуги зсуву, викликані комбінацією сильних термічних і механічних впливів; г – сильні смуги зсуву з майже розділеними сегментами стружки, викликані комбінацією дуже сильних термічних і механічних впливів.

Взаємодія інструмента і заготовки при сильних термомеханічних впливах на відміну від звичайних конфігурацій різання, сценарії агресивного різання навмисно розроблені для дослідження процесу взаємодії інструмента та заготовки під впливом термічних і механічних впливів більшої тяжкості, що досягається за рахунок використання більш фрикційної геометрії різання і при вищих швидкостях видалення матеріалу [8].

За таких умов температури різання вище 1000°C були широко досягнуті в таких сценаріях агресивного скорочення. Однак, якщо в умовах помірних-проміжних механічних впливів, що характеризують звичайні експерименти з різанням, пластини з полікристалічним кубічним нітридом бору змогли створити більш допустиму напругу теплового поля при більш ніж вдвічі більшій швидкості поверхні, ніж у марок цементованого карбіду з полікристалічним кубічним нітридом бору, що має температуру наконечника інструмента близько 200°C нижче, така ж тенденція не спостерігається за більш агресивних умов різання.

Фактично, виконуючи агресивне різання, пластини полікристалічного кубічного нітриду бору працювали при максимальній температурі наконечника інструменту вище 1100°C, умова за якої вони все ще здатні витримувати поле напруги, необхідне для різання матеріалу

заготовки з високою швидкістю видалення сплаву, який розглядається, завдяки їхній винятковій високотемпературній твердості [8].

Серйозність механічних і термічних впливів, викликаних агресивними конфігураціями різання в металі, що деформується на межі інструмент-заготовка, також можна якісно оцінити високими рівнями сегментації, викликані отриманою стружкою, як показано на рис. 6 в і г.

Насправді умови високої температури та високої швидкості деформації викликані експериментами з агресивним різанням призвело до утворення короткої та сильно зубчастої стружки, що вказує на появу сильної локалізації деформації перед різцем, у якій близькі шари матеріалу, які збираються сформувати нову (оброблену) поверхню, проходять перед їх механічною взаємодією з боковою стороною інструменту [8,9].

Досліджено термічну історію шарів пластичної деформації, спричинених механічною обробкою, також за суворих рівнів термомеханічної взаємодії заготовки. Зокрема, незважаючи на те, що агресивні та звичайні експерименти демонструють різні суміші термічних і механічних ефектів, необхідний уніфікований опис для узгодженого розгляду підповерхневої деформації розглянутих умов. Цією метою мікроструктурну цілісність поверхні спочатку буде охарактеризовано з точки зору



типу та ступеня шарів пластичної деформації, викликаних механічною обробкою, для різних експериментальних випадків.

Мікроструктурний аналіз підповерхневої деформації, викликаній різанням, в результаті різних комбінацій теплових і механічних впливів

Оскільки навантаження на деталь при механічній обробці виникає на межі розділу інструмент-деталь, найбільш серйозна мікроструктурна деформація виникає на найменших глибинах під поверхнею щойно вирізаної поверхні [8]. Співіснування різних ступенів тяжкості термічних і механічних ефектів за звичайних сценаріїв різання, коли більш високі температури досягали $\sim 900^\circ\text{C}$ на кінчику вставок зі швидкістю 30 м/хв, на відміну від $\sim 700^\circ\text{C}$, досягнута полікристалічний кубічний нітрид бору при 30 м/хв. Система набагато більш екстремальних термомеханічних умов була викликана експериментами з агресивним різанням, з температурами різання вище 1100°C при швидкостях до 130 м/хв, викликаних на межі розділу інструмент-деталь. Таким чином, зараз питання зосереджується на тому, який результат таких систем термічного та механічного впливу буде на кінцеву цілісність поверхні, і, що найважливіше, як можна розглянути їх термічну історію та пов'язати її з відповідними підповерхневими станами.

Мікроструктурна цілісність поверхонь, створених за звичайних і агресивних сценаріїв,

також має дуже відмінні властивості. Порівнюючи поверхневу деформацію, спричинену за низьких/проміжних термомеханічних умов (звичайні експерименти з різанням), опір матеріалу, шар опору матеріалу шарів у діапазоні 11–15 мкм (рис. 7) та подібні глибини, на які впливає первинна зона були створені за допомогою марок вставок полікристалічного кубічного нітриду бору та цементованого карбіду. Такі значення шару опору матеріалу фактично відносно далекі від розміру 24–28 мкм і типу мікроструктурної деформації, спричиненої агресивним різанням, яке спричинило як шар опору матеріалу, так і білі шари на підповерхні заготовки та більш важкі стани.

Спостереження шарів шар опору матеріалу, викликаних звичайним різанням марок цементованого карбіду і полікристалічного кубічного нітриду бору виявляє існування дуже схожих станів матеріалу, незважаючи на раніше згадані різні комбінації теплових і механічних ефектів. Обидва випадки фактично показують наявність переповненої серії вузьких слідів деформації, що виникають на обробленій поверхні та поширюються зі збільшенням нахилу до більшої глибини матеріалу, як показано на детальних видах (рис.7 в і г). Ця мікроструктурна умова пов'язана з великим спотворенням решітки [8,9] в результаті пластичності, викликаній різанням.

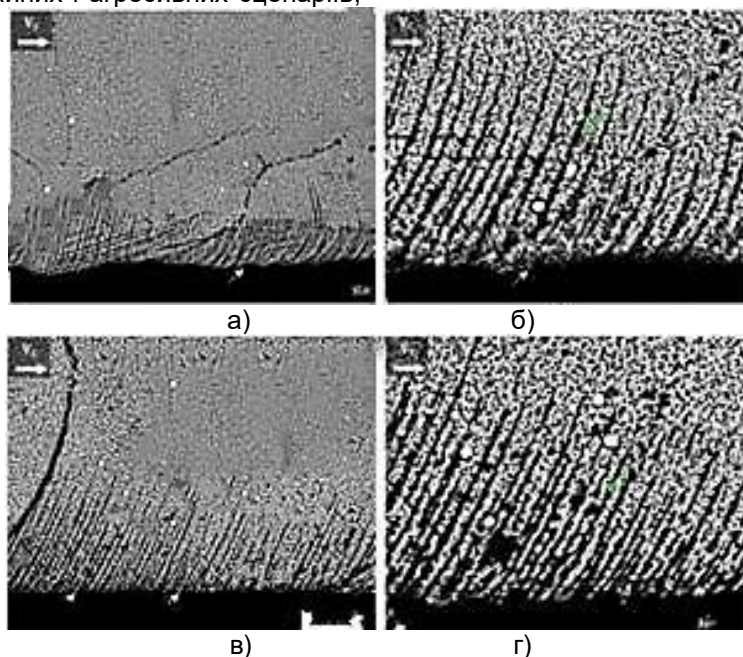
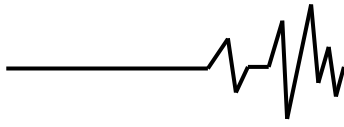


Рис. 7. Мікроструктурна цілісність поверхні в результаті звичайних умов різання; а – опір матеріалу, спричинений проміжними тепловими ефектами та механічними впливами низької інтенсивності; б – деталі слідів деформації, спричинених термічними ефектами низької інтенсивності та проміжними механічними впливами на поверхні заготовки; в – опір матеріалу, викликаний помірними тепловими ефектами та проміжними механічними впливами; г – деталі слідів деформації, спричинених помірними термічними та проміжними механічними впливами.

**Результати дослідження.**

Екстремальний клас термомеханічних явищ спостерігався, коли процес різання підштовхувався до своїх меж в умовах агресивної обробки [8]. Як було описано раніше, ці сценарії характеризуються гострим зазубринням стружки, високими температурами різання ($>1100^{\circ}\text{C}$ на кінчику вставки), утворення великих шарів опору матеріалу (до ~ 28 мкм) нанокристалічних шарів (>1 мкм) у найбільш важких випадках, з великою глибиною матеріалу, що представляє стан на розтяг (>200 мкм при понад 600 МПа).

Для вивчення механізмів, що керують цим класом явищ, тепер враховуються термічні цикли, спричинені агресивними умовами обробки. Представляє теплову карту, що зосереджується на взаємодії між ріжучою пластинною та нижньою поверхнею заготовки в рамках експерименту, проведеного за дуже високих термічних і механічних впливів (різання полікристалічним кубічним нітридом бору з температурою наконечника інструмента $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ у $V=130$ м/хв, $f=0,15$ мм/об, $r=30$ мкм, $\Delta_0=0,2$ мм). Порівняно з явищами, виявленими під час аналізу сценаріїв неагресивного різання, триступеневий термічний цикл, який відчуває підповерхня заготовки, відрізняється не лише величиною швидкості нагрівання-охолодження, але спостерігається квазіізотермічна область деформації, де звичайні умови різання спричинили вузька пікова область [9].

Отже, термічні цикли, викликані агресивним різанням, описуються такими фазами: Опалення (H): сипучий матеріал, що наближається до зони різання, піддається зростаючим швидкостям нагрівання, які досягають значень понад $107^{\circ}\text{C}/\text{с}$, отже, приблизно на один порядок вище, ніж ті, які викликані звичайними сценаріями різання. Максимальні значення теплових градієнтів уздовж та є вище $5000^{\circ}\text{C}/\text{мм}$, при цьому підповерхня заготовки зазнає збільшення.

Висновок. Аналіз зв'язку між тепловим полем і мікроструктурною деформацією під час механічної обробки представляє інтерес, який, однак, досліджувався в основному для вивчення первинних і вторинних зон зсуву.

Термічні і механічні ефекти, викликані різанням, можуть дати важливу інформацію про явища, що розвиваються на межі між інструментом і заготовкою, було показано, як їх неможливо загалом пов'язати з механізмом деформації оброблених поверхонь. Таким чином, було реалізовано більш вичерпний опис термічної історії поверхневої деформації з урахуванням комбінованого впливу інтенсивності теплового поля та швидкості при

якому процес деформації відбувається в підповерхні заготовки. Аналіз теплових циклів, викликаних різанням, не тільки дозволив кількісно описати змінювані в часі температурні умови, викликані на оброблених поверхнях під час різання, але також виявив, як тяжкість мікроструктурної деформації може бути якісно пов'язана з їх величиною та еволюцією.

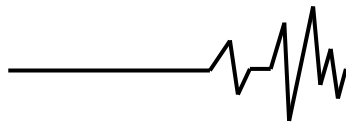
Крім того, застосування рівнянь теплового балансу в третинній зоні зсуву дозволило обговорити стадії утворення тепла на поверхні заготовки внаслідок її власної пластичної деформації у зв'язку з серйозністю мікроструктурного стану, що спостерігається за допомогою металургійного аналізу.

Поєднуючи інформацію, доступну з аналізу термічного циклу та картування теплогенерації третинної зони зсуву, мікомасштабна термомеханічна історія деформації поверхні може бути описана відповідно до процесу. Навіть якщо вони не деформуються в стружку, перш ніж потрапити третинну зону зсуву, підповерхневі шари заготовки проходять у безпосередній близькості від інтерфейсу стружки, де термомеханічні поля поширюються від сусідньої зони формування стружки.

1. На початку взаємодії між матеріалом заготовки та боковою стороною інструменту граничні умови входу третинної зони зсуву бачать вхідний матеріал заготовки у попередньо нагрітому стані. Величина швидкості нагріву сильно залежить від термофізичних граничних умов процесу різання (вставний матеріал, швидкість, подача тощо) зі значеннями в діапазоні $106^{\circ}\text{C}/\text{с}$ і $107^{\circ}\text{C}/\text{с}$ при звичайних і агресивних умовах різання відповідно. Було виявлено, що піки теплових градієнтів пов'язані з серйозністю мікроструктурної деформації, оскільки тепловий потік, що забезпечує існування цих градієнтів, забезпечується теплогенерацією внаслідок пластичної деформації. Однак їх розподіл у просторі безпосередньо не відповідає місцям, де відбувається пластичність, оскільки місцеві умови теплообміну допускають високі градієнти.

Список використаних джерел

1. Серета Л.П., Паладійчук Ю.Б., Будяк Р. В. Вплив дисипативних властивостей матеріалів протяжного інструменту на якість обробки гільз гідроциліндрів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. Вип. 2 (66). С. 87 – 89.
2. Paladiichuk Y. Study of characteristics of growth formation after deformation strength during deforming strength. *Architecture Medical sciences Technical science Physics and mathematics*. 2021. №2 (89). P. 30-



35. ISSN 2520-6990. DOI: 10. 24412/2520-2480-2021-289-30-36.

3. Шейкін С.Є., Студенець С.Ф., Мельниченко В.В., Мельниченко Я.В. Технологія відновлення карданних валів з застосуванням градієнтного деформаційного зміцнення. *Високі технології в машинобудуванні*. 2016. Вип. 1 (26). С. 118-125.

4. Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R., Shvets L., Paladiichuk Y., Aksom P., Rybak I., Sabadach B., Hryhorychen V. Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/12 (95). P. 48-56. ISSN 1729-3774.

5. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Типи і конструкції вібробуджувачів сучасного машинобудування. *Вібрації в техніці та технології*. 2022. № 4 (107). С. 26-35.

6. Паладійчук Ю. Б. Протягування порожнистих деталей машин інструментом з рельєфоутворювальними секціями: Автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ю. Б. Паладійчук; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2002. - 19 с.

7. Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Шелковий О. М., Пермяков О. А. Підвищення ефективності протягування за рахунок косокутного різання в зоні деформування. *Машинобудування*. 2017. № 20. С. 41-47.

8. Nemyrovskiy Ya., Shepelenko I., Posviatenko E., Tsekhanov Yu., Polotnyak S., Sardak S., Paladiichuk Y. Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 3. (7-105), P. 57-65.

9. Бандура В. М., Будяк Р.В. Дослідження фізико-механічних властивостей поверхні гілз після протягування. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 1.5 (67). С. 38-40.

References

1. Sereda L.P., Paladiichuk, Yu.B., Budak R.V. (2012). Vplyv dysypatyvnykh vlastyvostei materialiv protyazhnoho instrumentu na yakist obrobky hilz hidrotsylindriv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. vol. 2. no. 66, pp. 87–89. [in Ukrainian].

2. Paladiichuk Y. (2021). Study of characteristics of growth formation after deformation strength during deforming strength. *Architecture Medical sciences Technical science Physics and mathematics*. vol. 2. no. 89, pp. 30-35. DOI: 10.24412/2520-2480-2021-289-30-36. [in English].

3. Sheikin S.Ye., Studenets S.F., Melnychenko V.V., Melnychenko, Ya.V. (2016). Tekhnolohiia vidnovlennia kardannykh valiv z zastosuvanniam hradiientnoho deformatsiinoho zmitsnennia. *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni*. vol. 1. no. 26, pp. 118-125. [in Ukrainian].

4. Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R., Shvets L., Paladiichuk Y., Aksom P., Hryhorychen V. (2018). Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/12. vol. 95, pp. 48-56. [in English].

5. Paladiichuk Yu.B., Teliatnyk I.A. (2022). Typy i konstruktsii vibrzobudzhuvachiv suchasnoho mashynobuduvannia. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohii*. vol. 4. 107, pp. 26-35. [in Ukrainian].

6. Paladiichuk Yu.B. (2002). Protiaghuvannia porozhnistykh detalei mashyn instrumentom z reliefoutvoriuvannymy sektsiiamy: Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.01 / Yu.B. Paladiichuk; Nats. tekhn. un-t Ukrainy "Kyiv. politekhn. in-t". - K., 19 pp. [in Ukrainian].

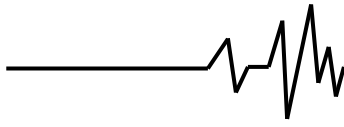
7. Skorkin A.O., Kondratiuk O.L., Shelkovyi O.M., Permiakov O.A. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti protiahuvannia za rakhunok kosokutnoho rezannia v zoni deformuvannia. *Mashynobuduvannia*. vol. 20, 41-47. [in Ukrainian].

8. Nemyrovskiy Ya., Shepelenko I., Posviatenko E., Tsekhanov Yu., Polotnyak S., Sardak S., Paladiichuk Y. (2020). Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. vol. 3. no. 7-105, 57-65. [in English].

9. Bandura V.M., Budak R.V. (2014). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei poverkhni hilz pislia protiahuvannia. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. no. 1.5. vol. 67, 38-40. [in Ukrainian].

RESEARCH OF THE THERMAL CYCLE ON THE SURFACE OF THE BILLET AS A CONSEQUENCE OF PLASTIC DEFORMATION DURING MECHANICAL PROCESSING

While the metallurgical characteristics of machined surfaces are constantly improving, there is still a lack of understanding regarding the thermal conditions in which these surfaces are in the process of interaction between the workpiece and the side surface. During machining of high-carbon alloys, very little is known about temperature changes in the internal volume of the



machined part, where the workpiece material interacts with the cutting edge of the tool.

In this work, the characteristics of the thermal field and the resulting surface metallurgy induced in high carbon alloys for cutting scenarios involving various combinations of thermomechanical boundary conditions were studied.

The analysis of the development of the thermal field on the surface of the workpiece made it possible to reveal the heating and cooling rates caused by cutting, allowing to describe two different types of thermal cycle, with the structure Heating-Peak-Cooling and Heating-Quasi-isothermal Deformation-Cooling depending on the aggressiveness of the process. The subsurface thermal zone is found to be related to the deformation caused by cutting because it combines information about the magnitude of the thermal field and the speed of the process. It was

found that the highest rate of heat generation caused by plastic deformation occurred in the thin surface layers at the beginning of the contact between the workpiece and the side surface, which was related to the conditions under which the white layers are generated.

The analysis of the energy balance indicated the development of a less strong and less impulsive deformation process at greater depths below the surface, which was related to the mechanism of the formation of material resistance layers. Thus, the thermal effect on the processed surfaces was interconnected with their final metallurgical structure, which made it possible to deeply understand the physical conditions that arise when cutting high-carbon alloys.

Keywords: *Plastic deformation, high-carbon alloys, cutting, thermal cycle, billet, machining.*

Відомості про авторів

Паладійчук Юрій Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Агроінженерії та технічного сервісу» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: rewet@vsau.vin.ua).

Телятник Інна Анатоліївна – аспірантка, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: inna201098@gmail.com).

Paladiychuk Yuriy – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: rewet@vsau.vin.ua).

Telyatnik Inna – postgraduate of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna st., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: inna201098@gmail.com).