

УДК 621.9(075.8)

В. В. Ступницький, Я. В. Долиняк
Національний університет "Львівська політехніка"**АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ЩОДО ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЧИННИКІВ НА СТАН
ПОВЕРХОНЬ У ПРОЦЕСІ ЇХ ФОРМОУТВОРЕННЯ**

© Ступницький В. В., Долиняк Я. В., 2016

Змодельовано теплофізичну реологічну картину різання, на її основі проаналізовано вплив динамічних показників температурних деформацій на якість обробленої поверхні, а також досліджено вплив термодинамічних показників на напружено-деформований стан заготовки та інструмента, а відтак на формування залишкових напружень та деформацій.

Ключові слова: імітаційне моделювання, напружено-деформований стан, теплофізична реологічна картина різання.

Simulated thermal rheological pattern cutting, the influence of dynamic deformation temperature indicators on the quality of surface finish, and the influence of thermodynamic parameters on the mode of deformation of the workpiece and the tool, and thus the formation of residual stresses and strains.

Key words: simulation, mode of deformation, thermal rheological pattern cutting.

Постановка проблеми. Один з основних чинників, що визначають напружено-деформований стан в зоні формоутворення поверхонь деталі та стружкоутворення, – це теплові явища, що виникають в результаті роботи різання. Закони теплоутворення пояснюють низку явищ, пов'язаних із силовими параметрами процесу різання, стійкістю інструмента та якістю обробленої поверхні. З метою побудови ефективної структури та параметрів технологічної операції необхідно змодельовувати теплофізичну реологічну картину різання і на цій основі проаналізувати, як динамічні показники температурних деформацій впливають на якість оброблюваної поверхні та дослідити вплив термодинамічних показників на напружено-деформований стан заготовки та інструмента, а відтак на формування залишкових напружень та деформацій, що визначально впливають на параметри втомної міцності, зносостійкості та корозійної стійкості функціональних поверхонь виробу.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз досліджень показує, що для успішного впливу на процес різання важливо знати величину теплоти, яка виникає під час оброблення, а також її розподіл, тобто ступінь концентрації теплоти в різних ділянках виробу, стружки і різця. Проводилася велика кількість досліджень щодо визначення цих показників. Так, наприклад, досліди Н. Н. Савіна, Я. Г. Усачова, С. С. Можаяєва та ін., які визначали кількість теплоти в стружці калориметричним методом, показали, що залежно від швидкості різання, глибини різання і подачі під час оброблення конструкційної сталі в стружці містилося 60–80 % всієї теплоти різання, а в швидкісних режимах різання – понад 90 %. Деякі дослідники (А. Я. Малкін) вважають, що регулюванням потоку теплоти можна впливати на процес різання, сприяючи йому, полегшивши роботу інструмента і підвищивши якість обробленої поверхні.

Виклад основного матеріалу. Теплота Q_{Σ} під час різання утворюється в результаті [2, 3]: внутрішнього тертя між частками оброблюваного металу в процесі деформації Q_1 ; зовнішнього тертя стружки об передню поверхню інструмента Q_2 ; зовнішнього тертя поверхні різання і обробленої поверхні об задню поверхню інструмента Q_3 ; відриву, деформації стружки та її диспергування Q_4 .

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 .$$

Найінтенсивніше виділення тепла відбувається у ділянці стружкоутворення, прилеглій до площини зсуву. В цій області теплота виділяється в результаті двох одночасних процесів: по-перше, в результаті пластичної деформації зсуву елементів новоутвореної стружки по площині

сколювання; по-друге, в результаті пластичної деформації стиску і частково зсувної пластичної деформації, що примикає до площини з боку зрізуваного шару припуску. Пружна деформація завжди передує пластичній деформації під час різання металів [4, 2, 5]. Кількість тепла, що виділяється в результаті пружної деформації, порівняно незначна, але нехтувати впливом цього процесу на теплофізичні характеристики процесу різання недопустимо. Нижче пояснено вплив цього чинника на формування температурних полів для різних матеріалів.

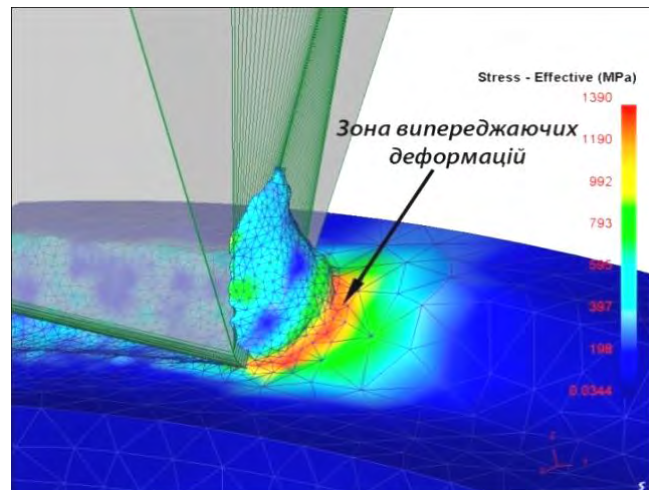


Рис. 1. Фрагмент 3D моделювання пружно-пластичної деформації заготовки, що утворюється перед площиною зрізу

З іншого боку, тепло, що утворюється під час різання, не акумулюється в місцях його генерування, а градієнтно поширюється від зон з вищою температурою до зон з нижчою температурою. Причому, відповідно до законів термодинаміки, інтенсивність такого потоку ($\frac{\partial T}{\partial x}$) тим вища, чим більша температурна різниця або менша відстань між окресленими зонами термічного впливу. Із зони різання тепло відводиться зі стружкою (q_1), передається в заготовку (q_2) й інструмент (q_3) і поширюється в навколишнє середовище (q_4) (0). Тепловий баланс процесу різання можна виразити рівнянням:

$$Q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 .$$

Наприклад, найбільша кількість теплоти Q_1 , що утворюється внаслідок деформації, залишається в стружці (q_1) й частково поглинається оброблюваною деталлю q_2 . Теплота тертя стружки Q_2 залишається здебільшого в стружці (q_1) і частково (3–5 %) спрямовується в інструмент (q_3). Теплота тертя по задніх гранях інструменту Q_3 спрямовується в деталь (q_2) і різець (q_3). Під час оброблення металів з низькою теплопровідністю, наприклад жароміцних і титанових сплавів, в різець відводиться до 20–40 % усієї теплоти [2]. Теплота диспергування стружки Q_4 практично повністю поглинається стружкою (q_1) або виводиться у навколишнє технологічне середовище (q_4) – мастильно-охолоджувальну рідину або в атмосферу. Втрати теплоти від конвекції та радіації під час різання дуже малі; невелика кількість теплоти, що йде в деталь, оскільки стружка дуже швидко формується в зоні різання і так само швидко проходить зону контакту з різцем.

Співвідношення кількості тепла, що відводиться зі стружкою у деталь, в інструмент і зовнішнє середовище, істотно залежить від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, режимів різання, геометрії різального інструменту і зовнішніх умов, в яких здійснюється процес різання.

Припускаючи, що механічна робота різання повністю переходить в теплоту, отримаємо:

$$Q = P_x \cdot V , \tag{1}$$

де Q – кількість теплоти, Дж.

Проте в реальних умовах на теплоту перетворюється не уся робота різання: невелика частина її переходить в потенційну енергію спотвореної кристалічної ґратки. Тому в повному вигляді формулу можна записати так:

$$Q = P_x \cdot V \cdot \alpha_0 , \tag{2}$$

де α_0 – коефіцієнт, що враховує втрати, пов'язані з деформацією кристалічної структури матеріалу.

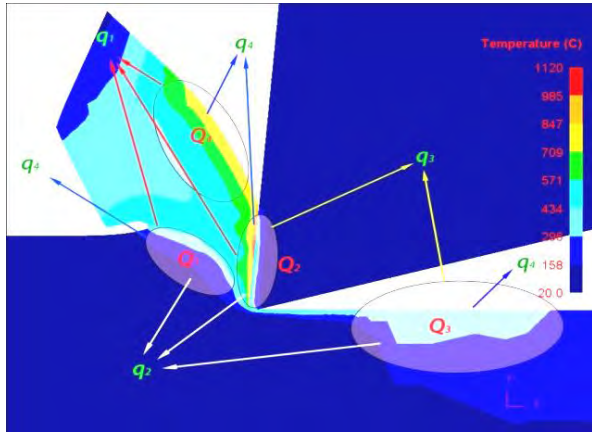
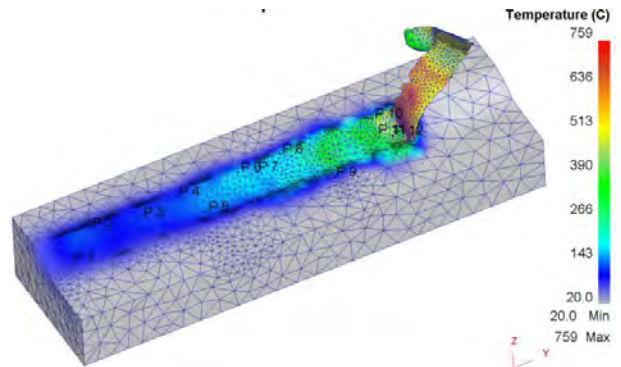
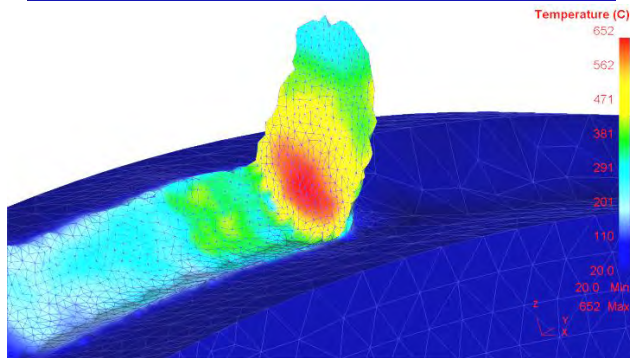


Рис. 2. Схема поширення та акумулювання джерел тепла в зоні різання



а

б

Рис. 3. Результати реологічного моделювання зони концентрації теплового поля на передній поверхні різця (а) та вздовж обробленої поверхні заготовки (б) (інструмент умовно не показаний) у системі Deform 3D

Для якісного та адекватного аналізу впливу температурного поля на процес різання важливо знати не лише кількість теплоти, але і розподіл її, тобто міру концентрації теплоти в різних ділянках виробу, стружки й інструменту. З іншого боку, якби вся теплота, що утворюється, швидко і рівномірно розподілялася по деталі та інструменту, то це привело б до рівноваги у процесі різання, забезпечувало би термодинамічну стабільність та рівномірне зношування інструменту. Насправді процес проходить інакше: велика кількість теплоти концентрується в певних зонах, істотно підвищуючи їхню температуру. Тут неминуча втрата різцем твердості, його затуплення і навіть можлива металографічна структурна зміна шару обробленої поверхні. Визначення градієнта поширення температури вкрай важливе. Так, проф. А. Я. Малкін вважає, що регулюванням потоку теплоти можна сприятливо впливати на процес різання і цим полегшити роботу інструменту та поліпшити якість обробленої поверхні [6].

На основі реологічного імітаційного моделювання процесу теплоутворення можна виявити закони зміни температури різання (на поверхні контакту стружки з передньою гранню різця), а також температури різального інструменту й оброблюваної деталі залежно від різних чинників та зіставити отримані дані з результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

Беручи до уваги вищенаведене твердження, що найбільше генерування тепла відбувається в результаті тертя стружки по передній поверхні, визначаємо роботу деформації стружки

$$R_D = P_{xf} V - P_T V \frac{1}{\xi}, \quad (3)$$

де V – швидкість різання; ξ – усадка стружки.

Оскільки $P_T = P_x \sin \gamma + P_y \cos \gamma$ (нехтуємо силою тертя по задній поверхні різця) і, отже, робота деформації стружки

$$R_D = P_x V \left[1 - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right], \quad (4)$$

де $\mu_0 = \frac{P_f}{P_T}$.

Теплота роботи сили тертя по передній грані за одиницю часу становить:

$$Q_2 = \frac{P_T V}{\xi}. \quad (5)$$

Щоб визначити температуру на передній поверхні різця, отриману в результаті тертя стружки, розглядатимемо різець як твердий стержень з поперечним перерізом, який дорівнює bl , на одній стороні якого підтримується постійна температура T_p [7]. Для вирішення поставленого завдання використовується рівняння теплопровідності [7]:

$$\frac{\partial T_p}{\partial \tau} = \omega \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \quad (6)$$

де $\omega = \frac{\lambda}{c\rho}$ – температуропровідність; λ – теплопровідність різця; c – теплоємність різця; ρ – густина; τ – час, протягом якого стружка проходить площу контакту завдовжки l :

$$\tau = \frac{l}{V_{СТР}} = \frac{l\xi}{V}. \quad (7)$$

Розв'язуючи рівняння за М. П. Левицьким [8], за початкових і граничних умов $T_x = T_p$ якщо $x = 0$, $T_p = 0$ за $\tau = 0$, отримаємо рівняння:

$$T_{\tau,x} = T_p \left(\frac{x}{\Delta} - \frac{2}{\pi} e^{-\frac{\pi^2 \sigma^2}{\Delta^2}} \sin \frac{\pi x}{\Delta} \right), \quad (8)$$

де $T_{\tau,x}$ – температура, що виникає від теплоти тертя в цій точці й у цей момент часу τ ; Δ – глибина, на яку проникає теплота тертя за час τ .

Зауважимо, що температура різання насправді має бути вищою, ніж отримана обчисленням за теоретичними формулами, оскільки не врахована теплота, що виділяється внаслідок тертя заготовки по задній поверхні різця. Остання складова матиме більше значення зі зростанням швидкості різання і у міру затуплення різця; особливо помітно підвищуватиметься температура оброблюваної деталі. Оброблювана деталь нагрівається передусім теплотою деформації. Очевидно, що температура деталі повинна зменшуватися зі збільшенням швидкості різання, оскільки зменшується T_D . Цей висновок, що впливає з аналізу формули (8), підтверджується на практиці у разі оброблення деталі загостреним різцем у нормальних умовах [2, 3]. Проте у міру затуплення інструменту і значного зменшення заднього кута α і кута в плані ϕ ситуація змінюється. У цьому випадку зі збільшенням сили тертя помітно зростають робота і теплота тертя по задній поверхні різця, і тому температура деталі підвищується зі збільшенням швидкості різання V . Водночас температура оброблюваної деталі зменшується зі збільшенням подачі S . Це цілком закономірно, оскільки зі збільшенням подачі сила тертя на задній поверхні різця залишається майже незмінною, але за певної довжини деталі зменшується відносний шлях різця (час оброблення) і, отже, зменшується робота сили різання.

Теоретичний розрахунок температури різання не завжди адекватний, оскільки у відповідних розрахункових формулах незалежні змінні є взаємозалежними параметрами. Так, теплоємність c збільшується, а теплопровідність λ зменшується зі зростанням температури. Довжина контакту стружки і різця зменшується зі збільшенням швидкості різання, але помітно зростає у міру зношування інструменту. Значення коефіцієнтів $(\alpha_0, \beta_0, \mu_0)$ також змінюються залежно від різних чинників. Крім того, температура в зоні різання залежить і від умов процесу різання, використання

мастильно-охолоджувальних рідин тощо. Тому для розрахунку температури різання частіше користуються емпіричними формулами, що показують закономірності зміни температури різання залежно від різних чинників і є адекватними в певних межах і умовах [1, 9].

У зв'язку з цим використання імітаційних реологічних моделей дає змогу найреальніше спрогнозувати термодинамічний стан заготовки та інструменту в швидкозмінних умовах різання, особливо на перехідних етапах – врізання інструменту, швидкої зміни напрямку подачі тощо. Для перевірки адекватності вищенаведених теоретичних положень у системі Deform 2D проведено реологічне імітаційне моделювання процесу точіння за швидкості різання $V=100$ м/хв. Матеріал заготовки – сталь 45. Матеріал інструменту – вольфрамо-кобальтовий сплав ВК6.

У результаті моделювання підтверджено, що найбільша кількість теплоти виділяється у стружку.

Найбільша температура інструмента, що зосереджена поблизу передньої поверхні різального леза, зумовлена інтерференцією основних джерел теплоти – Q_1, Q_2, Q_3 . На рис. 4 відображено температурне поле стружки і різця, отримане в результаті реологічного моделювання процесу оброблення заготовки зі сталі 45 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Ізотерми в зоні стружкоутворення розташовані орієнтовно паралельно до поверхні зсуву, а у різця майже концентрично навколо передньої поверхні різального леза. В цьому випадку, згідно з теорією теплопровідності, теплові потоки мають бути спрямовані нормально до ізотерм. У схемі на рис. 6, а вони показані відповідними векторами: D – у деталь; S – у стружку; I – у різець. Зауважимо, що ці дані, графічна інтерпретація яких подана на рис. 6, цілком корелюють з теоретичними положеннями [2, 3, 8].

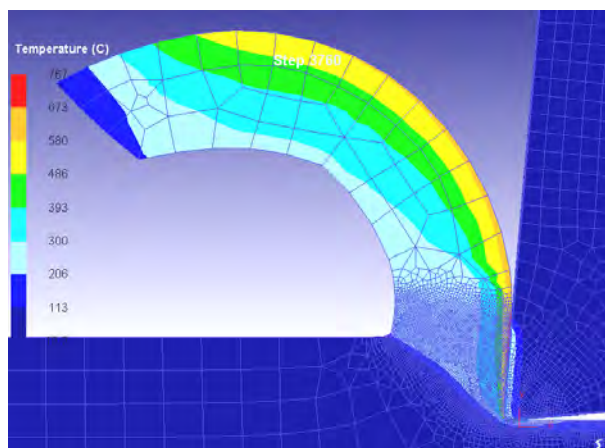


Рис. 4. Розподіл тепла між стружкою, інструментом і деталлю за швидкості різання 100 м/хв

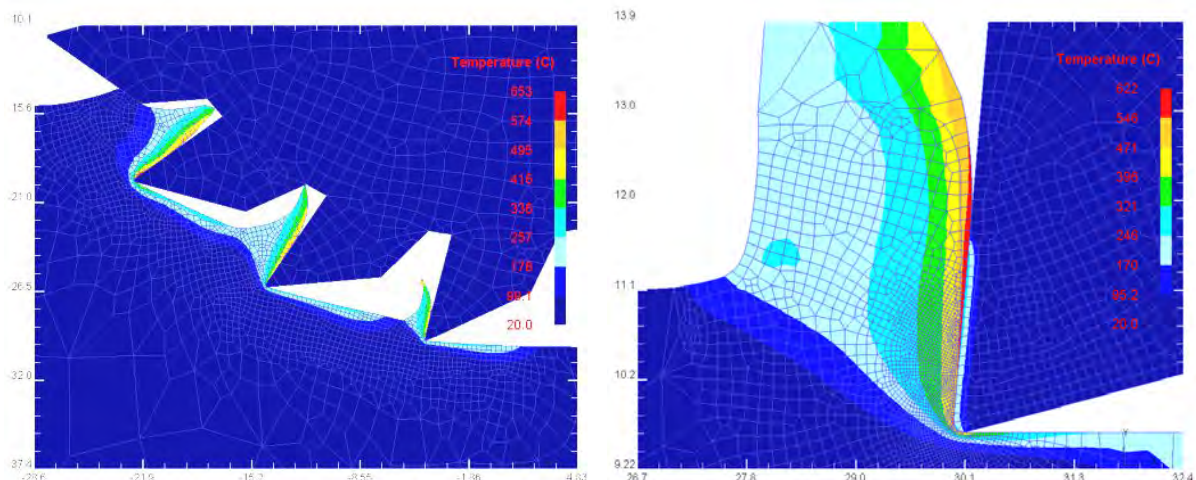


Рис. 5. Хромографічні картини температурних полів у разі фрезерування сталі 45, отримані в результаті реологічного моделювання у системі Deform 2D

У зоні стружкоутворення найвищі температури спостерігаються поблизу різальної кромки і в зоні наросту. Насправді усе складніше, оскільки температура різання залежить ще від довжини контакту поверхні різання і стружки по задній і передній поверхнях інструмента. Чим менша довжина контакту на задній поверхні, тим нижче середнє значення температури різання і тим ближче до різальної кромки розташований її максимум. У разі оброблення конструкційних сталей зі швидкістю $V > 100$ м/хв температура в зоні різання досягає $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на поверхні тертя по передній грані навіть $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 показана картина температурних полів під час оброблення заготовки зі сталі 45. У системі DEFORM реалізуються дві моделі тертя: “внутрішнє” – зсувне (shear) і “зовнішнє” – сухе тертя, що визначається за законом Амонтоно–Кулона (coulomb). За зсувного тертя слід використати коефіцієнти, що розраховують за формулою $f = mk$, де m – коефіцієнт тертя; k – межа текучості при зсуві. Для сухого тертя використовується коефіцієнт, що розраховують за формулою $f = mp$, де m – коефіцієнт тертя; p – довжина контакту між двома об’єктами. Аналіз реологічного експерименту дав підставу зробити висновок про те, що зона максимальної температури стружки майже повністю відповідає області, в якій стружковий елемент у зоні контакту з різцем підлягає пружним деформаціям, де використовується сухе тертя (відрізок BC), тоді як область пластичних деформацій (на ділянці AB реалізована модель зсувного тертя) нагрівається значно менше (для цього експерименту – приблизно на 100°).

Очевидно, що зі зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента середня температура стає концентрованою, а максимум температури віддаляється від різальної кромки (рис. 7). Це має істотне значення для стійкості різального інструмента і точності оброблення деталі, залежної від температурної деформації різця.

Щоб проаналізувати вплив швидкості різання на температуру в зоні стружкоутворення, змодельовано процес точіння заготовки, виготовленої зі сталі 45 за швидкостей різання: 100 м/хв, 150 м/хв, 200 м/хв, 250 м/хв, 300 м/хв інструментом з вольфрамо-кобальтового сплаву ВК6.

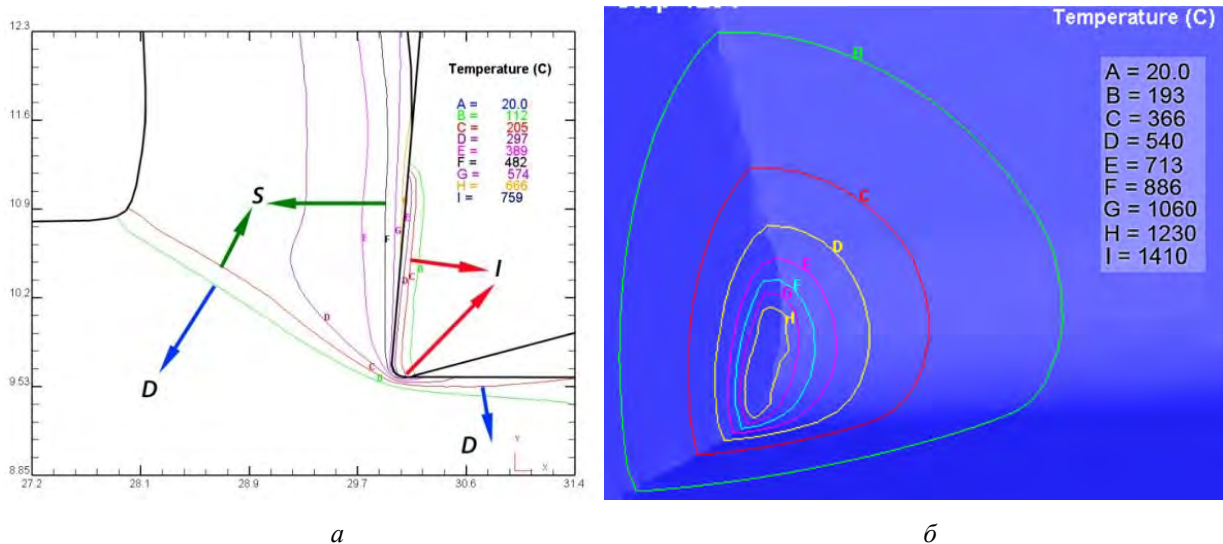


Рис. 6. Температурні поля стружки (а) і різця (б), отримані в результаті моделювання процесу оброблення заготовки зі сталі 45 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ мм/хв) у системі DEFORM 2D

З рис. 9 видно, що температура різання зростає менш інтенсивно, ніж швидкість. У міру нагрівання інструмента різниця температур стружки і різця знижується, а тому зменшується й інтенсивність теплопередавання від стружки до різця. Отже, зі збільшенням швидкості різання V температура різця зростає, але меншою мірою, ніж швидкість. Сучасні експериментальні дослідження процесу різання високоміцних сталей з ультрависокими швидкостями (до $72\ 000$ м/хв) показують, що процес відбувався майже адіабатично (без теплообміну). Таке явище супроводжується різким зниженням сил різання і значним окрихчуванням металу в зоні різання. Цей процес сприяє

швидкому відриванню стружки за повної відсутності пластичної деформації (усадки) стружки. Причому негативна усадка (видовження стружки) спричинена відцентровими силами за дуже великих швидкостей.

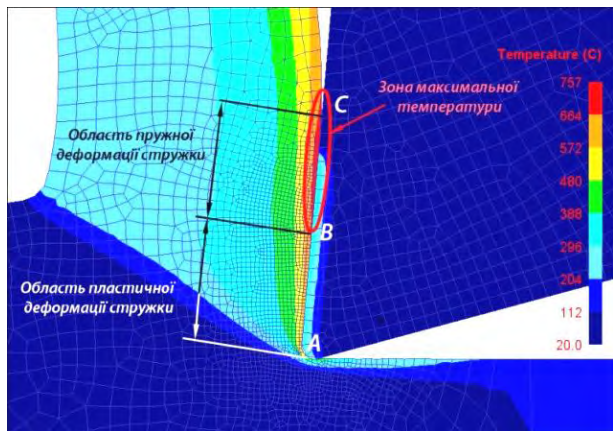


Рис. 7. Розподіл температурних полів у зоні контакту стружки і передньої поверхні інструменту

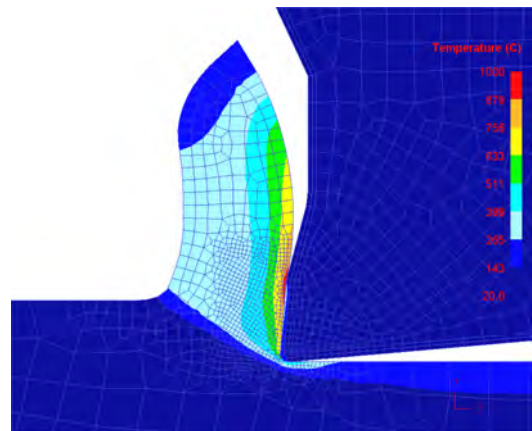


Рис. 8. Хромографічна картина, що демонструє вплив зменшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею на розподіл температурних полів у інструменті та у заготовці

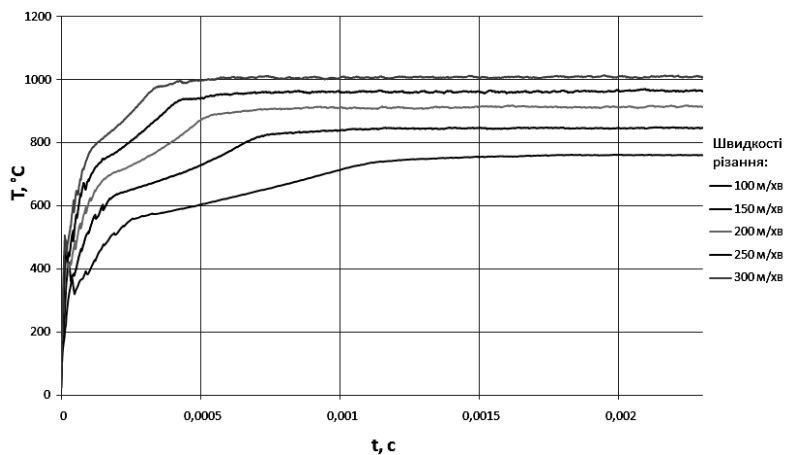


Рис. 9. Графіки залежності температури від швидкості різання

Нескладно передбачити залежність між глибиною різання t , подачею S і температурою, якщо розглянути зміну приросту і відведення теплоти в інструменті зі зміною t і S . Зі збільшенням подачі зростає тиск стружки на різець, а разом з ним і робота деформації. Але при цьому, як відомо, усадка стружки зменшується і, отже, робота деформації, що доводиться на одиницю об'єму стружки, також зменшується. До того ж тертя на задній поверхні інструменту зі збільшенням подачі мало змінюється. Тому кількість теплоти, що утворюється у стружці, збільшуватиметься меншою мірою порівняно зі збільшенням подачі. З потовщенням стружки відведення теплоти покращується, оскільки площа контакту стружки з різцем розширюється. У результаті температура різання зростає зі збільшенням подачі, але меншою мірою, ніж за підвищення швидкості.

Ще менше впливає на температуру значення глибини різання, оскільки навантаження на одиницю довжини різальної кромки не змінюється. Зі збільшенням глибини різання за постійного кута в плані j пропорційно збільшується довжина різального леза, але й еквівалентно посилюється тепловідведення від неї. Отже, на одиницю довжини різальної кромки збільшення теплоти буде дуже незначним. У результаті температура мало зміниться зі збільшенням глибини різання. Для підтвердження цих теоретичних міркувань у системі DEFORM 2D розроблено імітаційну модель, що

дала змогу проаналізувати вплив глибини різання на температуру в зоні стружкоутворення. Змодельовано процес точіння за глибин: 0,1 мм, 0,4 мм, 0,7 мм, 1,0 мм, 1,3 мм. Підтверджено, що зі збільшенням глибини різання в усталеній частині процесу різання зростає температура в зоні стружкоутворення, але тільки в діапазоні $S=0,1\dots0,4$ мм (на 20 %). За більшого зростання подачі різниця температур коливається у межах $50\dots70^\circ$, що становить 5–7 % різниці. Отже, глибина різання, істотно не впливаючи на температуру різання в заготовці, значно змінює температуру різального інструменту за рахунок зміни потужності теплових потоків. Зміна подачі супроводжується зміною температури різання, сил різання, інтенсивності зношення, а також довжини шляху різання, пройденого різцем під час оброблення деталі. Тому вплив подачі на температуру інструменту виявляється також і залежно від тривалості оброблення. Під час короткочасного оброблення зміна температури є наслідком зміни температури різання і величини теплових потоків, спрямованих в інструмент. У разі тривалого оброблення на величині температури позначається також вплив зношення інструмента.

Ще одним важливим чинником технологічного середовища є коефіцієнт тертя стружки і інструмента, що визначається не тільки фізичною величиною пари інструментальний матеріал – матеріал заготовки, а й наявністю та впливом мастильно-охолоджувального середовища. Змодельовано процес точіння за коефіцієнтів тертя: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7. Матеріал заготовки – сталь 45. Матеріал інструменту – ВК6. Підтверджено, що зі збільшенням коефіцієнта тертя практично пропорційно збільшується температура в зоні контакту (рис. 11).

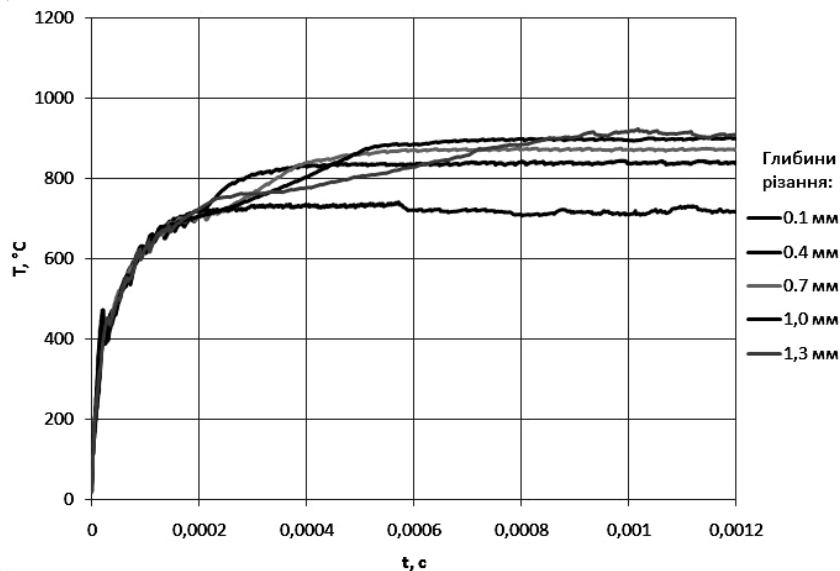


Рис. 10. Залежність температурних показників від глибини різання

Очевидно, що на температурні поля в зоні різання істотно впливають фізико-хімічні та механічні характеристики оброблюваного матеріалу (теплоємність, теплопровідність, густина, коефіцієнт тертя тощо). З метою аналізу впливу цих чинників на термодинамічні показники процесу різання проведено імітаційні реологічні дослідження під час оброблення конструкційних сталей та сплавів, що представляють репрезентативний спектр машинобудівних матеріалів (рис. 12). Так, під час різання крихкіших металів, наприклад, сталі 45, коли робота пластичної деформації менша і питомі сили різання порівняно незначні, температура різання помітно нижча (на 20 %), ніж під час оброблення сталі 20. Низька температурна провідність жароміцного хромонікелевого сплаву ХН60Ю спричинює концентрацію температури (до 1000°C) біля переднього різального леза й суттєві температурні деформації стружки та різального інструменту. Аналогічні висновки щодо температурних полів під час оброблення титанового сплаву ВТ6. У цьому випадку істотні коливання температур (10...12 %) пояснюються адиабатичним процесом стружкоутворення. Тепло, що виділяється у результаті роботи пластичної деформації, локалізується у вузькій зоні; деформація зсуву стає локально концентрованою, а стружка – суглобистою, циклічною, елементною. У разі

оброблення алюмінієвого сплаву АД33 температура різання є порівняно низька (приблизно 360 °С) не лише через незначне навантаження, але і внаслідок великої теплопровідності кольорових металів, у цьому випадку алюмінію.

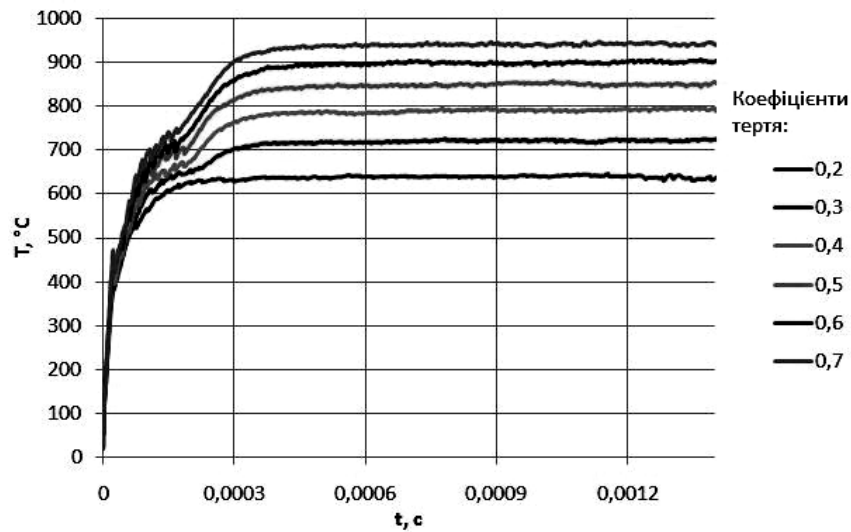


Рис. 11. Залежність температури від коефіцієнта тертя

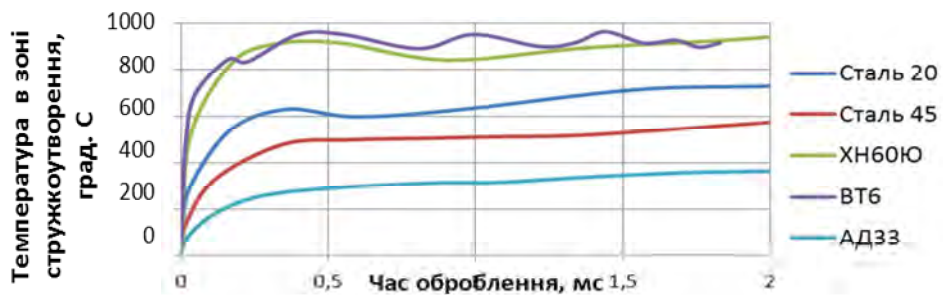
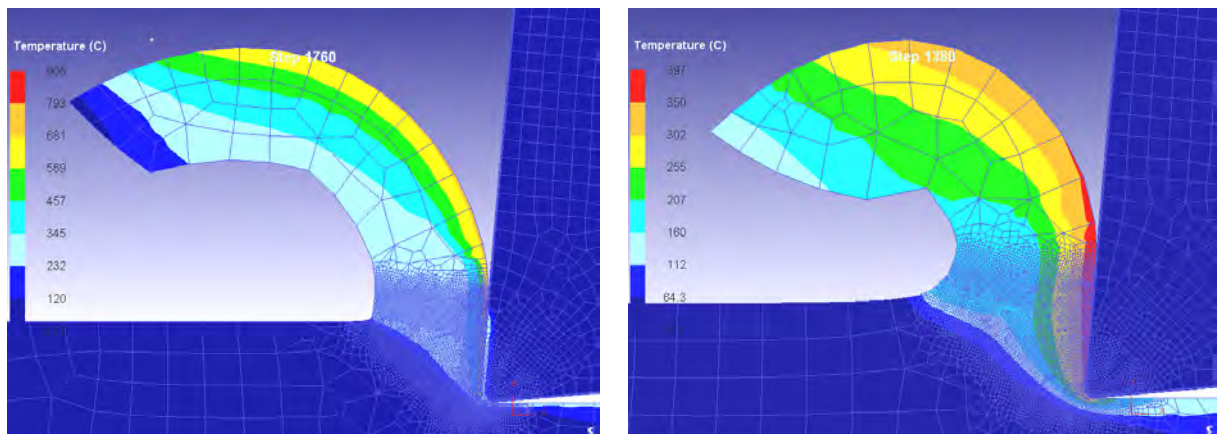


Рис. 12. Графіки залежності температурних показників різання від фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу



а

б

Рис. 13. Теплові поля в зоні стружкоутворення:
а – оброблення сталі 45; б – оброблення алюмінієвого сплаву AL 6061

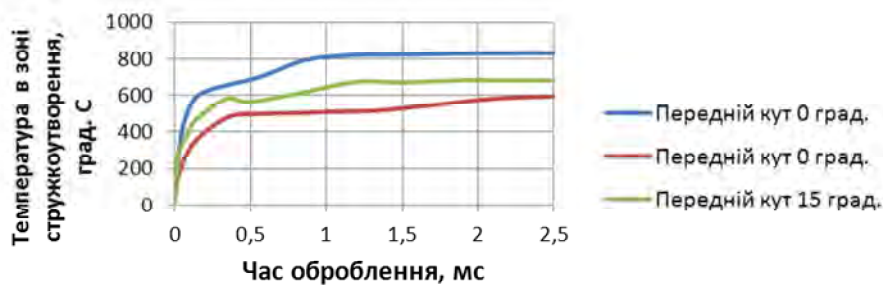


Рис. 14. Графіки залежності температурних показників різання від геометрії різального інструменту

Отже, геометрія різального інструменту істотно впливає на температуру різання. Вищенаведені дослідження доводять, що зі зменшенням переднього кута γ збільшується сила різання, а отже, підвищується кількість теплоти, що утворюється у зоні стружкоутворення, і температура різання (рис. 14). Відведення тепла в цьому випадку також посилюватиметься зі збільшенням кута клину β (кута загострення), але меншою мірою, ніж теплоутворення, і в результаті температура зростатиме. Величина кута в плані ϕ також впливає на температуру різання. Зі зменшенням кута ϕ дещо збільшується навантаження на різець і, здавалося б, нагріваючи його, повинно посилюватися. Проте насправді спостерігається зворотне: зі зменшенням кута ϕ видовжується різальне лезо, і, як наслідок, покращується тепловідведення.

Висновки. У роботі змодельовано теплофізичну реологічну картину різання, а на її основі проаналізовано вплив динамічних показників температурних деформацій на якість обробленої поверхні. Проаналізовано вплив швидкості різання на температуру. Встановлено, що зі збільшенням швидкості різання V температура різця значно підвищується, але меншою мірою, ніж швидкість (рис. 9). У роботі також показано, як саме на температурні показники впливає глибина різання. Виявлено, що температура мало змінюється зі збільшенням глибини різання (рис. 10).

1. Stupnytskyu V. Planning features of function-oriented technology engineering production / V. Stupnytskyu // *Scientific Potential*. – Elkraft, Indiana, Vol. 1, Issue 1. – P. 60–64. 2. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с. 3. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 4. Грановский Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 5. Яцерицын П. И. Теория резания / П. И. Яцерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с. 6. Малкин А. Я. Обработка резанием высокопрочных и жаропрочных материалов / А. Я. Малкин, С. В. Егоров. – М.: НТОмашпром, 1961. – 240 с. 7. Ливищ О. П. Моделирование формирования пластической составляющей высоты неровностей при лезвийной обработке методом конечных элементов / О. П. Ливищ, А. Е. Родыгина // *Металлообработка*. – 2008. – № 6. – С. 8–12. 8. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 9. Stupnytskyu V. Thermodynamic Pattern of the Workpiece Machining by the Rheological Imitation Modelling in Deform-3D System / V. Stupnytskyu // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”*. – Львів, 2013. – № 772. – С. 102–114.