

УДК 621.9(075.8)

В. В. Ступницький

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра технології машинобудування

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК З ТИТАНОВИХ І НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ РЕОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ

© Ступницький В. В., 2017

Описано результати імітаційного моделювання реологічних процесів механічного оброблення заготовок з титанових і нікелевих сплавів. Наведено методику моделювання напружено-деформованого і термодинамічного стану заготовки та інструменту, сили різання в умовах адіабатичного зсуву. Доведено, що процес утворення стружки під час обробки титанових і нікелевих сплавів відбувається в умовах нестійкого різання, яке веде до виникнення макроскопічного залишкового напруження, що виникає синхронно з ростом радіальної складової сили різання, інтенсивного зношування інструменту і динамічної нестабільності в зоні різання.

Ключові слова: механічне оброблення, стружка, залишкове напруження, сила різання.

The results of rheological processes simulation modeling of workpiece mechanical machining made from titanium and nickel alloys describes in the article. The method of simulation of stress-deformed and thermodynamic state of workpiece and tool, cutting forces in conditions of adiabatic shift is given. It is proved that the process of chips formation during the machining of titanium and nickel alloys occurs in conditions of unstable cutting, which leads to the emergence of macroscopic residual stress that occurs synchronously with the growth of the radial component of the cutting force, the intense wear of the tool and the dynamic instability in the cutting zone.

Key words: mechanical processing, shaving, residual stress, cutting force.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Титанові сплави мають високу питому міцність (співвідношення міцності до густини досягає значення 30–35 і більше), що майже удвічі перевищує питому міцність найпоширеніших у машинобудуванні легованих сталей [1]. Крім того, за підвищених температур титанові сплави за міцністю перевищують високоміцні сплави алюмінію і магнію [2, 9]. Отже, саме титанові сплави є основним матеріалом для виробів сучасного авіабудування, ракетобудування та інших виробів військово-промислового призначення. Підвищена корозійна стійкість зумовлює використання титану і його сплавів у хімічному, енергетичному машинобудуванні, під час виготовлення медичного устаткування тощо. За даними [13], в аерокосмічній промисловості використовують 41 % титану (24,6 тис. т), зокрема 33 % – у цивільній і 8 % – у військовій промисловостях; 47 % (28,2 тис. т) – в інших галузях промисловості (хімічній, енергетичній, опріснювальних установках тощо) і 12 % (7,2 тис. т) – в інших областях (спортивні товари – 8 %, броня – 2 % та ін.). У США 45 % титану споживається у цивільному літакобудуванні, 15 % – у військовій авіації і космонавтиці, 40 % – в інших галузях, включаючи хімічну, нафтогазову промисловість, суднобудування, медицину. Серед використовуваних в Західній Європі сплавів переважає сплав Ti-6Al-4V (80-85 %), далі йдуть сплави Ti-10V-2Fe-3Al; Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si (10–15 %) і технічно чистий титан (4 %) [2]. Згідно з прогнозами, в найближчі 3–5 років споживання титану у Західній Європі збережеться на високому рівні і навіть може збільшитися на 10 % (переважно за рахунок росту споживання заготовок для дисків (до 1600 т/рік) і листів (для надпластичної деформації) [2].

Нікель і сплави на його основі також характеризуються поєднанням підвищеної міцності з високою корозійною стійкістю. Найзалежніші в авіаційних двигунах є нікелеві і титанові жароміцні сплави, з яких виготовляють робочі і соплові лопаті, диски ротора турбіни, деталі камер згоряння тощо. Залежно від технології виготовлення ці сплави можуть бути ливарними, пластично-деформованими і порошковими. Найжароміцнішими є ливарні складнолеговані сплави на нікелевій і титановій основі, деталі з яких здатні працювати за температур 1050–1400 °С впродовж сотень і тисяч годин за високих статичних і динамічних навантажень [2].

Очевидно, що під час проектування структури і параметрів технологічного процесу механічної обробки деталей, що експлуатуватимуться під дією значних циклічних силових і термодинамічних навантажень, необхідно враховувати, окрім точності і якості поверхневого шару, такі параметри, як зношування, стійкість, залишкове напруження і деформації, втомна міцність тощо. Реалізація таких технологій повинна здійснюватися на основі функціонально-орієнтованих технологій (ФОТ) [11]. Науково-інформаційна база ФОТ здійснюється на основі дослідження напружено-деформованого і термодинамічного стану заготовки в процесі її обробки.

Виклад основного матеріалу. Внаслідок високого співвідношення межі текучості до тимчасового опору розриву титанові і нікелеві сплави є важкооброблюваними матеріалами. Наприклад, це співвідношення для титанових сплавів знаходиться у межах 0, 85–0,95, тоді як для сталей воно становить лише 0,65–0,75. При цьому механічні характеристики титанових сплавів (відносне подовження d і відносне звуження y) порівняно з жароміцними сталями істотно менше. Знижені пластичні властивості титанових сплавів в процесі їх механічної обробки сприяють розвитку тих, що випереджають лезо інструмента, мікро- і макротріщин. Стружка, що утворюється під час оброблення титанових сплавів, на вигляд нагадує зливну, але має дефекти характерної форми, які розділяють її на дуже слабо деформовані елементи, пов'язані тонким і дуже деформованим контактним шаром. Фактично ті самі умови стружкоутворення характерні для різання заготовок нікелевих сплавів. Особливості і причини утворення такої стружки розглянемо нижче. Отже, за механічної обробки титанових і нікелевих сплавів виникають великі питомі напруження, що зумовлює наявність високих температур в зоні різання, зумовлених низькою теплопровідністю ущільнювальних зон в області стружкоутворення. Це сприяє ускладненню відведення теплоти із зони різання. У результаті сильної адгезії і високих температур оброблюваний матеріал налипає на різальний інструмент, який призводить до значного збільшення сили тертя. Налипання і приварювання фрагментів титану на контактні поверхні різального інструмента призводять також до зміни його кінематико-геометричних параметрів. Відхилення геометричних параметрів різального інструмента від оптимальних значень зумовлює подальше підвищення сил тертя, температури в зоні різання та інтенсивне зношування інструмента. Кути адіабатичного зсуву під час різання титанових сплавів досягають 38–44°. У цих умовах за швидкостей різання, що перевищують 60 м/хв, можливе утворення стружки з коефіцієнтом усадки $K_t < 1$, тобто стружка має більшу довжину, ніж шлях різання. Температура в зоні різання істотно підвищується зі збільшенням швидкості різання, і меншою мірою – зі збільшенням подачі [7].

Вважають, що трудомісткість механічної обробки заготовок з титанових сплавів у 3–4 рази більша, ніж для вуглецевих сталей, і в 5–7 разів вища, ніж для алюмінієвих сплавів [12]. Коефіцієнт відносної оброблюваності титанових сплавів ВТ6, ВТ20 і ВТ22 по відношенню до сталі 45 становить 0,22–0,26 [9]. Під час механічної обробки заготовок з титанових сплавів рекомендують малі швидкості різання за невеликих подач з інтенсивним охолодженням.

Для обробки титанових сплавів різанням використовують різальний інструмент, виготовлений зі стійкіших до зношування інструментальних матеріалів, ніж для обробки сталей, віддаючи перевагу при цьому твердим сплавам. Проте навіть за дотримання усіх описаних заходів, режими різання, особливо швидкості, мають бути знижені в 3–4 рази порівняно з обробкою сталей для забезпечення прийнятної стійкості інструмента, особливо під час обробки на верстатах з ЧПК.

Для титанових сплавів характерна висока хімічна активність у взаємодії з киснем, азотом і воднем. Це викликає надмірну крихкість поверхневого шару заготовки в результаті дифузії атомів газів під час підвищення температури різання. Насичена атмосферними газами стружка втрачає пластичність і в цьому стані не піддається звичайній усадці. Під час обробки титанових сплавів спостерігається схильність матеріалів різального інструмента до абразивного зношування в результаті вмісту в титанових сплавах нітриду і карбідів. Проте за підвищення температури міцність титанових сплавів знижується інтенсивніше, ніж у нержавіючих і жароміцних сталях і сплавах. Обробка різанням “по кірці” кованих, пресованих, литих заготовок з титанових сплавів ускладнена додатковою абразивною дією на різальні кромки інструмента неметалічних включень – оксидів, сульфідів, силікатів і численних дефектів, які утворюються в поверхневому шарі. Неоднорідність структури знижує вібростійкість процесу обробки титанових сплавів. Ці обставини, а також концентрація значної кількості теплоти в межах невеликої ділянки контакту на передній поверхні інструмента призводять до переваги механізму крихкого руйнування як результату розвитку мікро- і макротріщин, утворення локальних концентраторів напруження у місцях сколювання металу [12]. За високих швидкостей різання інтенсифікується теплове зношування інструмента, на передній поверхні різця з’являється лунка.

В умовах реалізації наукомісткого машинобудівного виробництва важливим етапом його технологічної підготовки є вивчення процесу різання важкооброблюваних матеріалів за умов, для яких технологічні системи або їх елементи тільки створюються, наприклад, різання інструментами з нових інструментальних матеріалів, з новими покриттями і з новою геометрією леза, нанообробка тощо. Це завдання може бути виконане за допомогою імітаційного моделювання процесів різання. Для наявних математичних моделей процесів механічної обробки потрібні дані про вид стружки, її усадку, характер розподілу контактного напруження, середній коефіцієнт тертя тощо. Такі дані можна отримати, використовуючи методики, які ґрунтуються на проведенні численних експериментальних досліджень процесів різання, що вимагає значних матеріальних витрат, і що часто є технічно нездійсненним. Прогресивнішим методом дослідження є створення імітаційних моделей процесів різання. Тому теоретичне узагальнення щодо силових, деформаційних і теплових процесів формоутворення, використання адекватних критеріїв деформації і руйнування для описання поведінки металів під час стружкоутворення; врахування фактичного стану контактних поверхонь інструменту, умов утворення стружки різного виду тощо є актуальними науковими проблемами [3, 4, 12].

Найперспективнішими є моделі процесу різання, що ґрунтуються на числових методах, які дають можливість виконувати завдання деформації і руйнування зрізаного шару на основі фундаментальних рівнянь термодинаміки тіла за допомогою дискретизації простору. Одним з таких методів є метод кінцевих елементів. Зважаючи на вищесказане, методом кінцевих елементів в програмному продукті DEFORM реалізовані моделі різних процесів різання сталей і сплавів (зокрема, титанових і нікелевих), і розроблені методики розрахунку форми стружки, напружено-деформованого і термодинамічного стану заготовки і леза інструмента, сили різання тощо. DEFORM – спеціалізований інженерний програмний комплекс, розроблений компанією Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), призначений для аналізу процесів обробки металів тиском, термічної і механічної обробки [6]. У програмному продукті DEFORM використовуються аналітичні залежності, що описують вплив структури і параметрів процесу різання (в т.ч. термодинамічних) на закономірності формування показників точності, мікрогеометрії, структурних і фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Результати імітаційного моделювання дають повну інформацію про процеси внутрішнього тертя, в’язкості, адгезії на поверхнях контакту інструмента і заготовки (стружки), інтенсивності зсуву. Аналіз цих результатів дає змогу визначити вплив кінематики, робочих режимів і параметрів різального клина інструмента на хвилястість і шорсткість оброблюваної поверхні, напружений і фазовий стан, статичні і динамічні параметри температурних, деформаційних, силових показників [1, 6].

Початковими даними для моделювання процесу різання в системі DEFORM є:

- 2D- або 3D-модель деталі з нанесеною лагранжевою або ейлеровою сіткою на поверхні;
- режими різання;
- 2D- або 3D-модель інструмента, геометрія різального клина, його матеріал і покриття;
- міцнісні, фізико-механічні та теплофізичні характеристики оброблюваного матеріалу;
- модель зношування леза інструмента і кінетика наростоутворення;
- нормативна похибка збіжності результатів моделювання по силовому вектору, вектору швидкості і допустимій геометричній похибці;
- тип завдання деформації і течії металу (Lagrangial Incremental або Steady – State Machining);
- вид ітераційного методу розрахунку (прямий ітераційний, або Ньютона-Рафсена),
- вибір розрахункового ядра (метод розріджених матриць, або метод Skyline).

У такій постановці завдання є синергетичним, пов'язаним з вивченням процесів самоорганізації, підтримання стійкості і розпаду підсистем різної природи на основі методів математичної фізики ("формальних технологій") [8]. Імітаційне моделювання реологічних процесів різання ґрунтується на уявленні про руйнування, як про втрату здатності матеріалу до опору деформації внаслідок порушення внутрішніх зв'язків, що досягається в результаті критичної концентрації мікротріщин (крихкий матеріал) або досягненні енергетичного порога окремим елементом звичайно-елементної сітки (пластичний матеріал). Варто також зазначити, що ідеальних умов руйнування в природі не існує. Будь-який матеріал можна тільки з певним допущенням зарахувати до крихких або пластичних матеріалів, для яких характерні відповідні умови обробки і математичний апарат, який їх описує або імітує. В інженерній практиці прийнято, що міцність ідеально крихкого матеріалу за стиску у вісім разів перевищує його міцність на розтяг. Сьогодні також не існує єдиної концепції для аналітичного описання механізмів різання, так само, як і його універсального критерію, за яким можна однозначно описати основи процесу механічної обробки. На достатньому рівні теоретично розроблені і експериментально підтверджені тільки окремі випадки аналітичних моделей руйнування і проведені їх узагальнення [1, 6]. Враховуючи це, проведено дослідження силових, деформаційних і енергетичних критеріїв руйнування і на підставі порівняння їх з експериментальними даними, зроблено висновки щодо їх адекватності реальним процесам [10].

На рис. 1 показані результати імітаційного реологічного моделювання різання заготовки з титанового сплаву BT6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V) (подача – $S=0,25$ мм; глибина різання – $t=1$ мм; швидкість різання – $V=120$ м/хв). З графіків бачимо, що сили різання в поперечному і поздовжньому напрямку коливаються у дисонансі з високою частотою (приблизно 1,6 кГц).

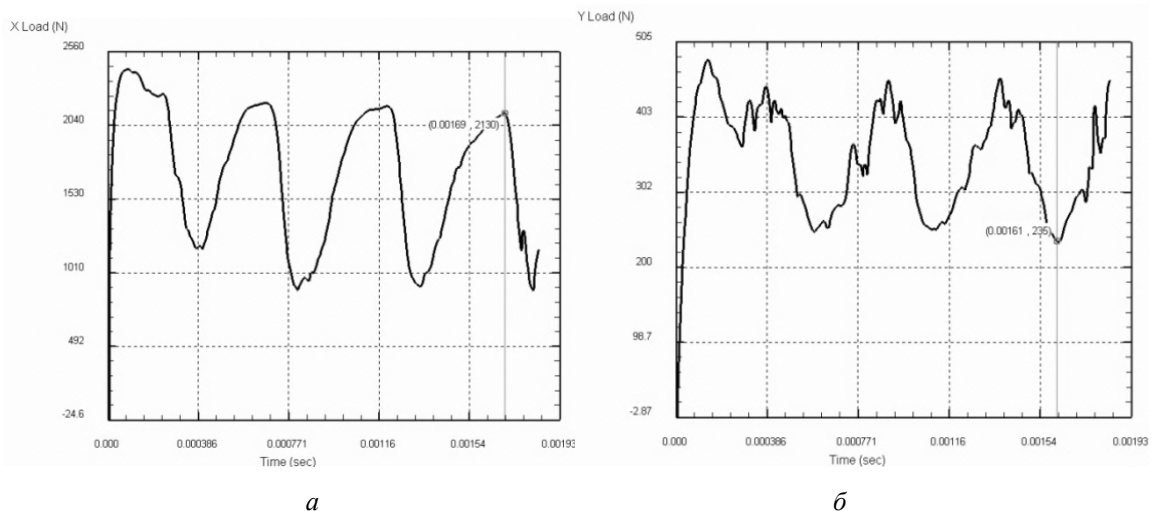


Рис. 1. Складові сил різання деталі з титанового сплаву BT6 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ м/хв) визначені на основі аналізу імітаційної моделі у системі DEFORM 2D:
а – у поперечному напрямку; б – у поздовжньому напрямку

Оскільки під час оброблення деталі з титанового сплаву ВТ6 переважає крихке руйнування з періодичним сколюванням матеріалу по передній і задній поверхнях інструменту, відповідно до рекомендацій [10], в імітаційній моделі використаний деформаційний критерій руйнування Мак-Клінтока.

В умовах високошвидкісної деформації матеріалу відбувається явище адіабатичного зсуву – утворення локальних зон підвищеної пластичної деформації, енергія якої перетворюється на теплову, що знижує межу текучості. Для титанових сплавів характерна надзвичайно низька теплопровідність, значно нижча, ніж для жароміцних сталей і сплавів [1]. Наприклад, для сплаву ВТ6 параметр теплопровідності становить 11 Вт/(м (К)), тоді як для сталей 12Х18Н9Т і 45, відповідно, 23 і 40 Вт/(м (К)). Як наслідок, під час різання заготовок з титанових сплавів виникає температура, яка більш ніж у 2 рази перевищує рівень температур під час обробки заготовок зі сталі 45. За активного виділення теплоти в умовах стружкоутворення з більшою швидкістю, ніж її відведення у сферу охолодження, за рахунок теплопровідності теплота концентрується поблизу смуг або площин ковзання, що сприяє виникненню т. зв. адіабатичних смуг зсуву (рис. 4). За деформації зсувом перехід від однорідної деформації до адіабатичного зсуву визначається величиною і швидкістю деформації. На прикладі, показаному на рис. 2, чітко окреслені зони надмірної деформації ($\epsilon = 4,8$ мм/мм) (рис. 2, а). Ще більше локалізованою є зона підвищеної інтенсивності деформацій ($\dot{\epsilon} = 104000.130000$ ((мм/мм)/с)) (рис. 2, б). Температура в області адіабатичного зсуву становить 1350...1390 °С і залежить, окрім величини і інтенсивності деформації, і від теплофізичних характеристик матеріалу (рис. 2, в). Утворення адіабатичних смуг зсуву може призвести до руйнування по цих смугах і утворення сегментної стружки. Крім того, в ділянці високих температур можуть відбуватися поліморфні перетворення або утворення зони інтенсивної деформації. В екстремальних умовах, коли відбувається процес стружкоутворення, найвірогіднішим є встановлення динамічної рівноваги між кристалічною і аморфною структурними фазами матеріалу – у цьому випадку титанового сплаву ВТ6.

Недостатня стійкість зони адіабатичного зсуву розвивається у місці концентрації напруження в твердому тілі, напружений стан якого загалом однорідний. При цьому відбувається поширення вузької смуги значних пластичних деформацій уздовж площин максимального напруження зсуву до того часу, поки не відбудеться розвантаження або доки у матеріалі не утвориться магістральна тріщина [5]. Адіабатичний зсув є одним з найважливіших механізмів руйнування під час динамічного навантаження, за якого руйнування може відбуватися за крихким сценарієм, незважаючи на переважання пластичних властивостей оброблюваного матеріалу. На рис. 3 проілюстрований механізм виникнення зони адіабатичного зсуву. Так, в певний момент імітаційного дослідження ($t=1,16$ мс) виникає поперечна сила різання максимальної величини ($P_X \approx 2100$ Н). У цей самий час поздовжня сила різання набуває мінімального значення ($P_Y \approx 260$ Н). Цей етап стружкоутворення припускає переважання процесу стискування зони стружкоутворення з характерною опуклістю кореня стружки по зовнішній поверхні. У момент різання ($t=1,35$ мс) відбуваються протилежні явища: поперечна сила різання приймає мінімальне значення ($P_X \approx 1000$ Н), а поздовжня сила різання – максимальне значення ($P_Y \approx 500$ Н). Цьому етапу відповідає повне переважання зсувних механізмів стружкоутворення з характерною угнутістю стружки по зовнішній поверхні. У момент різання ($t=1,6$ мс) етап домінуючого стиску зони стружкоутворення повторюється тощо.

Жароміцні і нержавіючі сплави на нікелевій основі найчастіше зараховують до матеріалів аустенітного класу, які містять кристаліти з гранецентрованою кристалічною ґраткою [12]. Для жароміцних сталей відношення умовної межі текучості, яка відповідає 0,2 %-й залишковій деформації, до тимчасового опору становить 0,40–0,45, в той час, як для конструкційних сталей – 0,60–0,65 і більше. Дослідження мікротвердості коренів стружки показали, що за обробки сплаву ХН60Ю вона приблизно в 2 рази більша, ніж у недеформованого металу; відносне зміцнення для хромонікелевих сплавів становить 50–60 %, що значно нижче, ніж за обробки середньовуглецевих конструкційних сталей [12]. Враховуючи те, що жароміцні і нержавіючі сталі і сплави мають

нижчу теплопровідність порівняно з традиційними для машинобудування конструкційними матеріалами, за їх обробки виділяється значна кількість теплоти, різко зростає температура в зоні різання. Порівнюючи температурні поля, характерні для обробки заготовок із сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю (режими різання-подачі – $S=0,25$ мм; глибина різання – $t=1$ мм; швидкість різання – $V=120$ м/хв), можна зробити висновок, що температура у зоні різання жароміцного сплаву на 50 % вища за температуру під час обробки сталі 20 (рис. 4). Це сприяє активізації адгезійних і дифузійних процесів, інтенсифікується зношування робочих поверхонь інструментів.

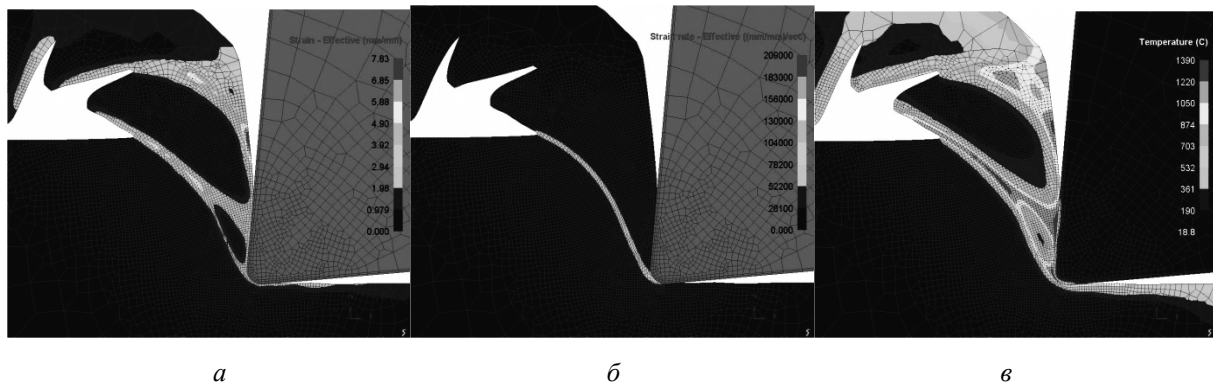


Рис. 2. Хромографічна картина деформованого стану (а), швидкості деформації (б) і термодинамічного стану у зоні адіабатичного зсуву під час оброблення титанового сплаву ВТ6

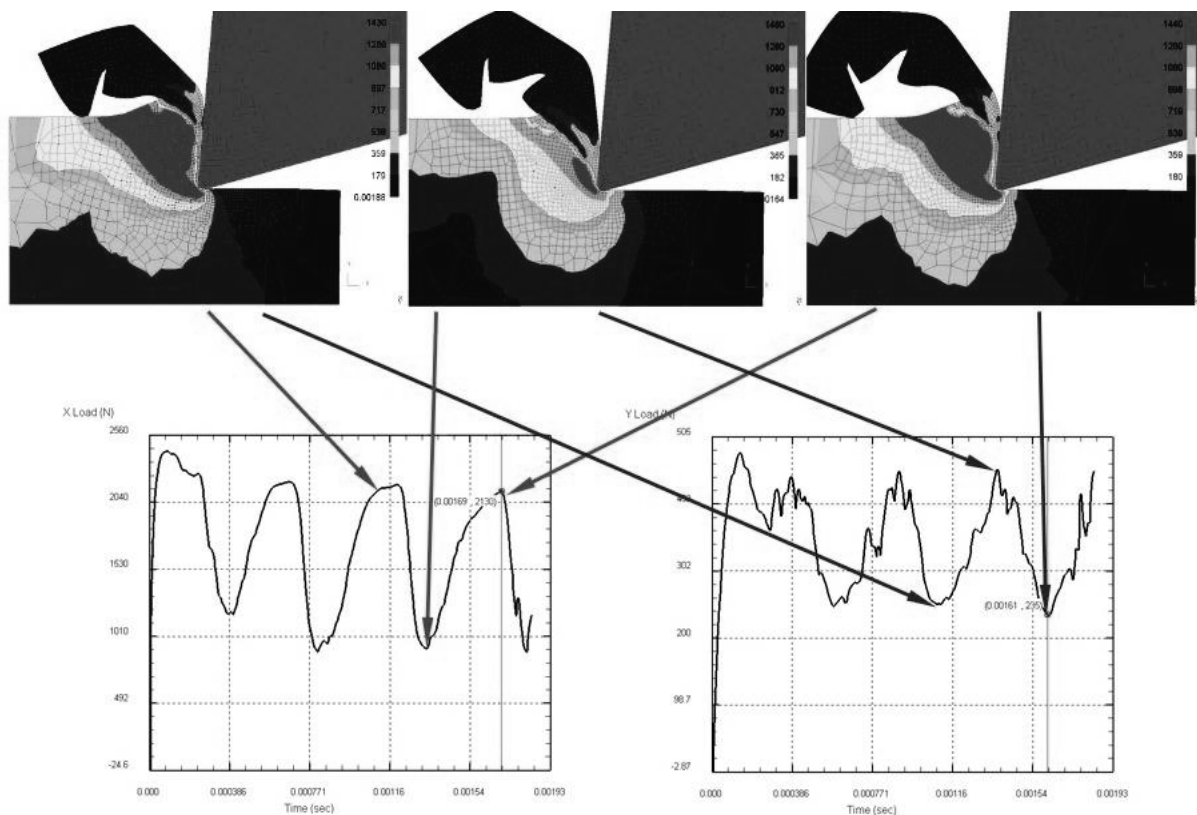


Рис. 3. Зв'язок між картиною стружкоутворення і силовими параметрами різання в динаміці під час оброблення титанового сплаву ВТ6 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ м/хв) визначені на основі аналізу імітаційної моделі в системі DEFORM 2D

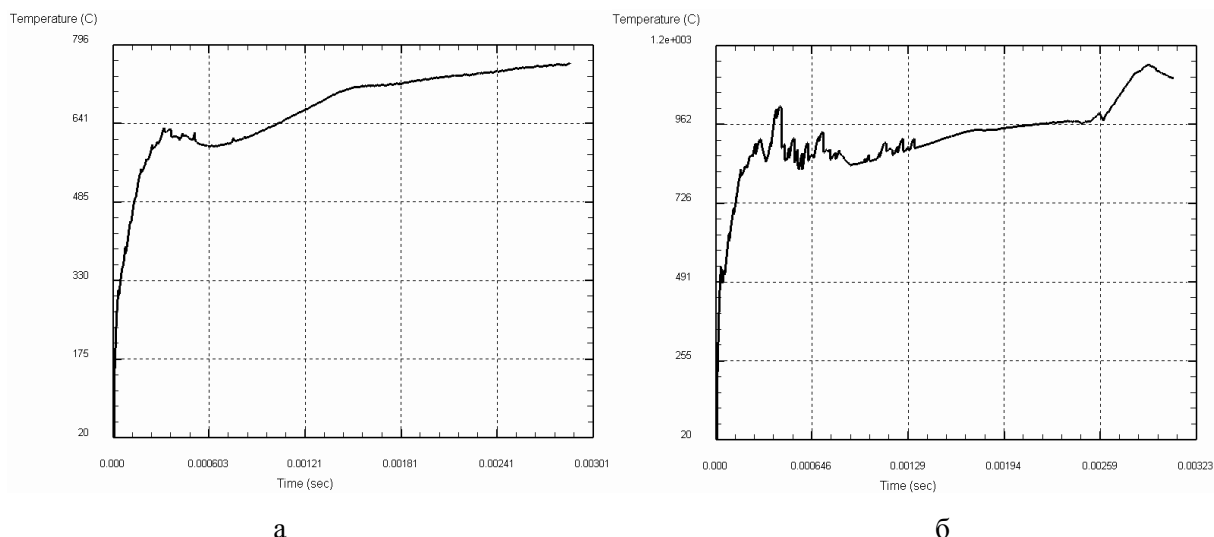


Рис. 4. Порівняння температурних полів за токарної обробки заготовки із сталі 20 (а) і жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718) (подача – $S=0,25$ мм; глибина різання – $t=1$ мм; швидкість різання – $V=120$ м/хв)

Здатність сплавів на титановій і нікелевій основі зберігати початкову міцність і твердість за підвищених температур призводить до того, що в процесі різання інструмент підпадає під високі питомі навантаження. Так, за нагрівання сплаву ХН60Ю до температури 700°C його тимчасовий опір становить $s_B = 900\ldots 1000$ МПа, а за температури 800°C – $s_B = 800\ldots 900$ МПа [8]. Своєю чергою, під час нагрівання заготовок із сталі 45 до цих значень температур параметр s_B знижується у 3–5 разів [12]. Тому на передній поверхні різального інструмента діють високі питомі навантаження (7–11 МПа) (рис. 6), які відповідають навантаженням, що виникають під час оброблення загартованих конструкційних сталей з твердістю 60...64 HRC. Цій обставині сприяють також великі порівняно з конструкційними сталями значення коефіцієнта тертя на контактних ділянках, зумовлені інтенсивною адгезійною взаємодією. Висока хімічна спорідненість оброблюваного і інструментального матеріалів викликає явище їх схоплювання, аж до руйнування контактних ділянок. Найбільшу здатність до адгезії мають метали, у яких підвищена пластичність, з атомними діаметрами, які відрізняються не більше ніж на 15...18 % (наприклад, залізо – хром, залізо – мідь) [8].

З урахуванням цих особливостей процесу стружкоутворення за механічної обробки титанових і нікелевих сплавів підтверджується фізична суть процесу різання, сформульована П. І. Ящерициним у [12]. Спочатку інструмент врізається в матеріал заготовки, і під його дією відбувається пластична деформація шару металу, який супроводжується поглинанням енергії, яка прикладається ззовні; зрізаний шар металу при цьому зміцнюється і стає крихким. Потім відбувається дуотермічний зсув і утворення стружки. В результаті малої теплопровідності оброблюваного матеріалу теплота різання концентрується в зоні відділення стружки і сприяє активізації процесів адгезії і дифузії, викликаючи руйнування різальних кромки інструменту. Вказані явища разом з підвищеними абразивними і механічними властивостями сплавів на основі титану і нікелю за високої температури, а також змінна дія цих чинників спричиняють виникнення вібрацій (рис. 3), інтенсифікують процес зношування різальної кромки інструмента. Ці особливості сплавів різко погіршують їх оброблюваність різанням порівняно із звичайними конструкційними сталями і чавунами. Швидкість різання з підвищенням жароміцності важкооброблюваних сталей і сплавів знижується у 10–20 разів порівняно з обробкою звичайної конструкційної сталі 45. При цьому в 1,5 раза підвищується сила різання ($P_X=2120$ Н – для сталі 45; $P_X=3240$ Н – для сплаву ХН60Ю (рис. 5)), що є причиною високих температур у зоні різання, а також невеликої стійкості різального інструменту.

На рис. 5 показано побудовані в результаті імітаційного моделювання у системі DEFORM 2D графіки подовжньої (а) і поперечної (б) складових сили різання, що виникає під час обробки заготовки з нікелевого жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718) (подача – $S = 0,25$ мм; глибина різання – $t = 1$ мм; швидкість різання – $V = 120$ м/хв).

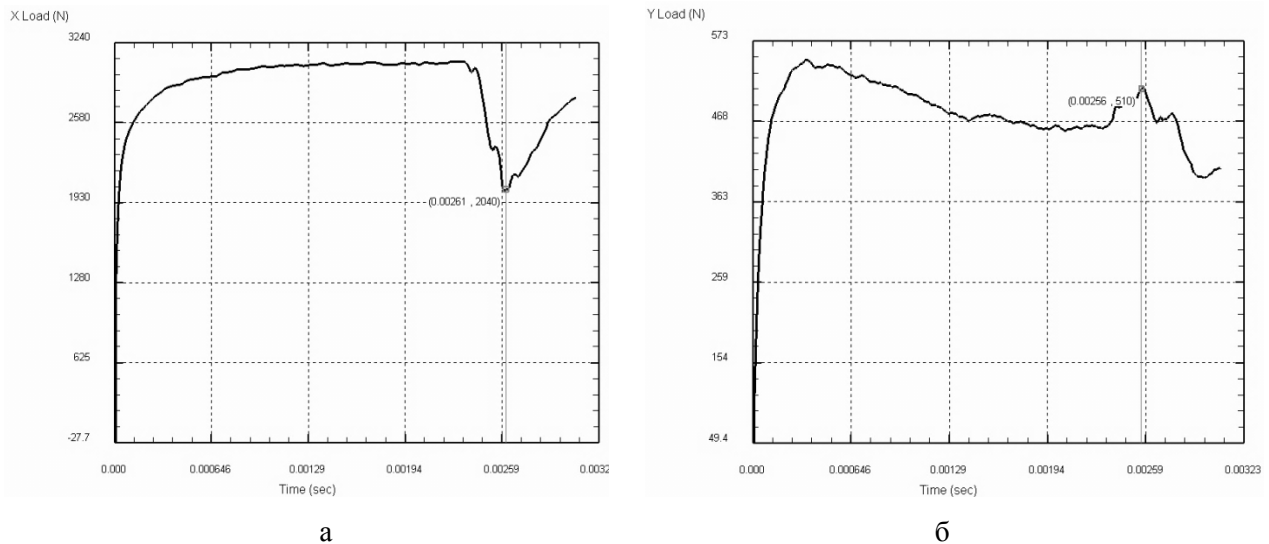


Рис. 5. Поздовжня (а) і поперечна (б) складові сил різання ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ м/хв) заготовки з жароміцного сплаву ХН60Ю, визначені на основі аналізу імітаційної моделі в системі DEFORM 2D

Різке падіння поздовжньої і підвищення поперечної сили різання після 2,6 мс, викликане викривленням зовнішньої сторони стружки під впливом адіабатичних явищ (детальніше описаних нижче), що зумовлює зміну кута зсуву і коефіцієнта усадки стружки. У динаміці процес зародження і розвитку процесу надлому стружки під час обробки жароміцного сплаву ХН60Ю показаний на рис. 6.

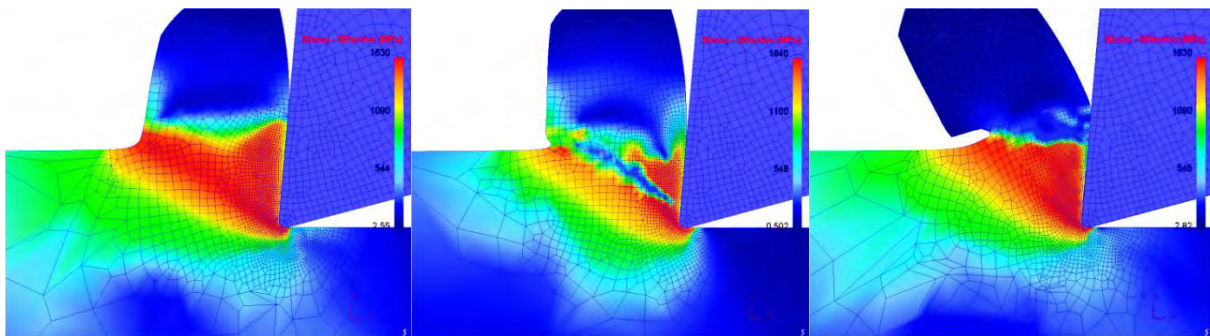


Рис. 6. Процес утворення надлому стружки під час обробки жароміцного сплаву ХН60Ю (у динаміці)

Професор А. Альбрехт вивів залежності для визначення частоти і амплітуди циклічного утворення сегментів стружки (рис. 7) [5]. У міру руху інструменту матеріал в зоні зсуву безпосередньо перед різальною кромкою переміщатиметься із швидкістю різання V . З іншого боку може відбуватися зсув матеріалу зі швидкістю V_0 . Для умов адіабатичного зсуву у певний момент часу V_0 буде меншим, ніж V . Отже, матеріал вільної поверхні переміщатиметься з порівняно меншою швидкістю, ніж матеріал, який примикає до різального леза. Кут зсуву буде змінним по довжині зони зсуву – від V до V_0 . Професор Альбрехт експериментально показав [5], що час τ зміни

швидкості від V до V_0 є гранично меншим порівняно з часом переходу від V_0 до V . Тому форма стружки є зубчастоподібною, а не симетричною. Отже, період часу повного циклу стружкоутворення можна прийняти таким, що дорівнює τ .

З рис. 7 отримаємо частоту ν утворення зубчастих смуг:

$$n = \frac{1}{t} = \frac{V - V_0}{t} \cdot \frac{1}{\text{ctg} b - \text{ctg} b_0}.$$

Амплітуду коливання стружки a визначаємо з геометричних побудов (рис. 7):

$$a = t \cdot \cos j \cdot (\text{ctg} b - \text{ctg} b_0).$$

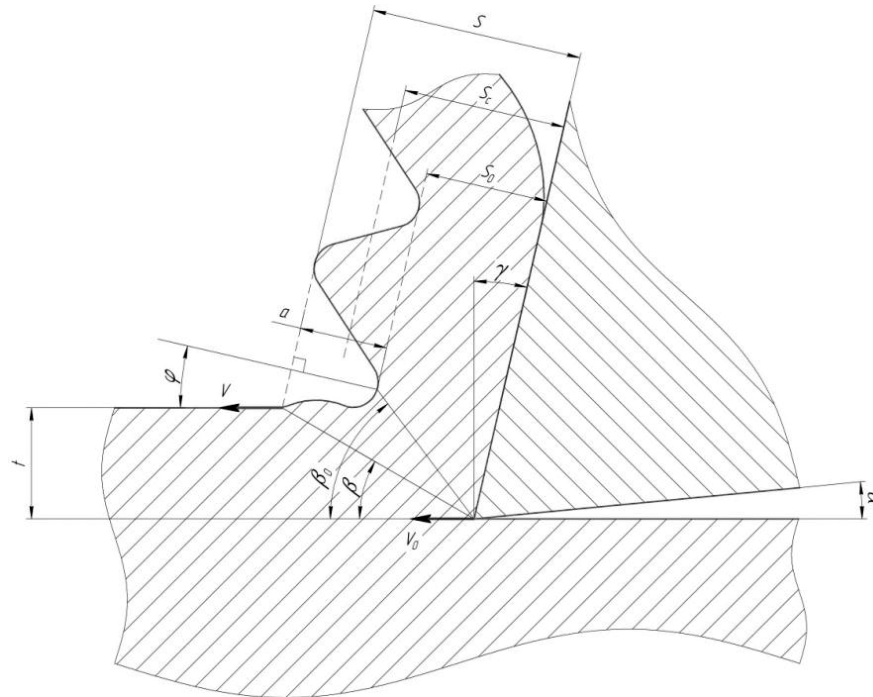


Рис. 7. Схема аналізу форми стружки в умовах адіабатичного зсуву (за А. Альбрехтом)

Результати теоретичних досліджень зіставлялись з результатами імітаційного моделювання процесу різання, проведеного в системі DEFORM, а також з результатами експериментальних досліджень (рис. 8). Статистичний аналіз результатів показав задовільну похибку геометричних параметрів стружки, отриманих експериментально (до 10 %), і повну відповідність розташування зони підвищеної деформації (що визначена згідно з [7] за напрямком текстури металу) результатам теоретичних та імітаційних досліджень.

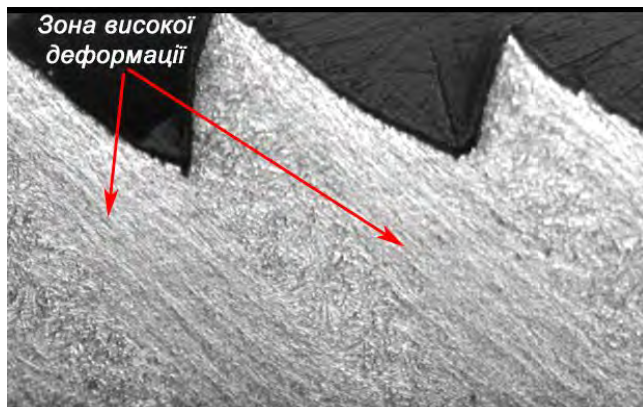


Рис. 8. Форма стружки під час токарної обробки взірця з титанового сплаву ВТ6 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ м/хв)

Отже, частота ν прямо пропорційна до швидкості різання і обернено пропорційна до товщини зрізу, а амплітуда a прямо пропорційна до товщини зрізу і не залежить від швидкості різання. Враховуючи, що динаміка кута зсуву і зміна швидкості на вільному кінці і корені стружки можуть бути визначені в імітаційній моделі конкретного технологічного переходу, використання підсистеми автоматизованого формоутворення деталі (CAF-system), описаної в [3, 4, 11], є найефективнішим рішенням для технологічного управління процесом циклічного стружкоутворення.

Висновки. Результати імітаційних і експериментальних досліджень процесу стружкоутворення під час обробки сплавів на основі титану і нікелю показують, що геометрична форма стружки, характерна для адіабатичного зсуву, зумовлена умовами опору пластичної деформації, циклічністю дії сил різання і геометричної зміни кута зсуву. Кількість елементів зсуву за одного врізання різального клина в метал визначає частоту коливань сили різання за час контакту, а зміна опору металу в зоні формоутворення на початку і в кінці шляху ковзання в умовах дії високої температури і великої швидкості деформації визначає величину амплітуди сили різання. Отже, процес утворення стружки під час оброблення титанових і нікелевих сплавів відбувається в умовах нестійкого різання, яке призводить до виділення великої кількості теплоти, виникнення макроскопічного залишкового напруження першого роду, сприяє інтенсивному зношуванню інструмента і динамічній нестабільності в зоні різання.

1. Davim J. Paulo. *Machining of Hard Materials*. London: Springer, 2011. – 225 p.
2. Durul Ulutan, Tugrul Ozel. *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2011. – № 51. – P. 250–280.
3. Stupnytsky V. *Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering* // *Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing*. – Stuttgart (Germany). – 2013 (Maart). – № 3. – Section 1, Vol. 2. – P. 50–53.
4. Stupnytsky V. *New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering* // *Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing*. – Stuttgart (Germany). – 2012 – № 1. (November-Dezember). Section 13. – P. 327–329.
5. Армарего И. Дж. А., Браун Р. Х. *Обработка металлов резанием*. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
6. *Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів* / Д. В. Криворучко, В. О. Залоза, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 208 с.
7. Резников А. Н. *Тепловые процессы в технологических системах* / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Силин С. С. *Метод подобия при резании материалов*. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
9. Ступницький В. В. *Аналіз оброблюваності титаномістких сплавів деталей енергетичних установок на основі імітаційного реологічного моделювання процесу різання в системі Deform 3D* // *Матер. Всеукраїнської наук.-практ. конф. “Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування”*, 10–12 жовтня 2012 р. – Херсон: ХДМА, 2012. – С. 205–210.
10. Ступницький В. В. *Аналіз та вибір критерію локального руйнування під час імітаційного моделювання процесів різання у системі Deform 2D* // *Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”*. – 2012. – № 729. – С. 107–115.
11. Ступницький В. В., Магерус Б. Р. *Використання автоматизованого програмного комплексу DEFORM для дослідження температурних та деформаційних параметрів під час різання металів* // *Український міжвідомчий науково-технічний збірник “Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні”*. – Львів, 2012. – № 46. – С. 145–152.
12. Ящерицин П. И. *Теория резания* / П. И. Ящерицин, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
13. *Titanium alloys*. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_alloy.