

УДК 621.9(075.8)

**В. В. СТУПНИЦЬКИЙ**, канд. техн. наук,  
**А.М. КУК**, канд. техн. наук, Львів, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАГОТОВКИ ВІД ПЕРЕДНЬОГО КУТА РІЗАЛЬНОГО КЛИНА НА ОСНОВІ РЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

На формування напружено-деформованого стану заготовки в зоні стружкоутворення суттєвий вплив має величина переднього кута різального клина. З метою дослідження впливу цього технологічного чинника на показники, що визначатимуть силові та деформаційні параметри процесу різання, проведений аналіз реологічного імітаційного моделювання при обробленні різнорідних конструкційних матеріалів, що найчастіше використовуються в машинобудуванні.

На формирование напряженно-деформированного состояния заготовки в зоне стружкообразования существенное влияние оказывает величина переднего угла режущего клина. С целью исследования степени влияния этого технологического фактора на показатели, которые будут определять силовые и деформационные параметры процесса резания, проведен анализ реологического имитационного моделирования при обработке разнородных конструкционных материалов, чаще всего используемых в машиностроении.

The magnitude of the cutting wedge's rake angle has a significant influence on the stress-strain state in the chip formation zone. Rheological analysis of simulation for machining heterogeneous structural materials, which are often used in engineering, conducted to investigate the influence of this factor to the technological characteristics that will determine the strength and deformation parameters of the cutting process.

**Вступ.** Дослідження і опис основних закономірностей протікання різних процесів при механічному обробленні дозволяє підійти до пояснення масопереносу в умовах стружкоутворення, сформулювати основні принципи інтенсифікації різних процесів при обробленні металів. Дослідження процесів високошвидкісної деформації і руйнування матеріалів, з одного боку, дозволяє судити про динаміку зміни стану

речовин на субструктурному рівні за характером протікання процесів, а з іншого боку, розробити якісно нові фізичні принципи інтенсифікації методів обробки, контролю процесу обробки і діагностування стану різального інструменту. На основі всебічного вивчення взаємозв'язку деформаційних, післядеформаційних процесів і процесів руйнування матеріалів, структурних змін в умовах високих швидкостей обробки можливий науково-обґрунтований підхід до використання отриманих результатів при оптимізації режимів різання. Врахування проміжних станів матеріалу заготовки під час різання в рамках механіки локального руйнування вимагає аналізу існуючих розрахункових концепцій та моделей. Відповіді на ці питання можуть бути знайдені тільки на основі аналізу основних характеристик напружено-деформованого стану у найбільш характерних точках області стружкоутворення, отриманих шляхом використання для розрахунків реологічних моделей структури оброблюваних матеріалів в зоні різання, що адекватно описують їх реальні властивості. До основних характеристик відносяться дані про напруження, деформації, швидкості деформацій і температуру в зоні стружкоутворення. Одним з найширше важливих інструментів для дослідження локальних характеристик напружено-деформованого стану (НДС) в пластичній області є метод кінцевих елементів, який реалізований у таких відомих програмних продуктах світового рівня, як DEFORM, ABAQUS, LS DYNA, Advantage. Ці програмні продукти дозволяють з достатньою точністю зробити розрахунок сил різання, усадки стружки, конфігурації і площі контактної поверхні з інструментом і меж пластичної зони, провести розподіл силових та деформаційних показників, швидкостей деформацій і температур як в зоні стружкоутворення, так і в інструменті [5, 9].

У статті проаналізовані результати імітаційного моделювання реологічної картини різання ізоморфного пластичного матеріалу, отриманої моделюванням процесу в DEFORM 2D.

**Виклад основного матеріалу статті.** При обробленні пластичних матеріалів із середніми режимами різання і геометричними параметрами різального інструменту, напружене поле стружки має більший вплив на деформацію металу поверхневого шару, ніж напружене поле в зоні діатермічного зсуву. В результаті цього в поверхневому шарі виникає

залишкове напруження розтягу. Збільшення зусиль різання і відповідних полів напруження, пов'язане зі зміною режимів різання, призводить до зростання залишкового напруження розтягу. При збільшенні переднього кута різального клина  $\gamma$  коефіцієнт усадки стружки зменшується. Це підтверджується рядом досліджень, які показують, що із збільшенням переднього кута  $\gamma$  зменшується тертя стружки об передню поверхню інструменту, що у свою чергу призводить до збільшення кута зсуву  $\beta_1$ . Відомо, що чим більший кут зсуву, тим менший коефіцієнт усадки стружки [3, 6]. Крім того, при обробці пластичних металів, приповерхневий шар деформується не лише під впливом силового поля передньої поверхні різця, але одночасно деформується під впливом стікаючої стружки. У зв'язку з тим, що інтенсивність пластичної деформації металу стружки значно вище за інтенсивність деформації металу під поверхнею зсуву, деформовані об'ємні ділянки заготовки *під впливом* верхнього шару металу, *що йде* в стружку, додатково витягуються у напрямі стружки, і у момент відділення орієнтуються по відношенню до напрямку вектору швидкості під кутом більше  $45^\circ$  [6].

Зі збільшенням переднього кута  $\gamma$  сила різання зменшується і процес відділення стружки протікає з меншою затратою енергії, а отже оброблюваний матеріал менше підлягає деформаціям. Проте, при великих передніх кутах ( $\gamma > 15^\circ$ ) міцність різця знижується: різальне лезо такого різця швидко зношується, а нерідко навіть викришується [3]. Тому, коли підбирають передній кут  $\gamma$ , мають на увазі не тільки зменшення сили різання, але й одержання необхідної міцності різального леза і стійкості різця. Тобто, чим твердішим є оброблюваний матеріал, тим меншим повинен бути передній кут різця [3]. На рис.1 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента  $\gamma$  при обробленні конструкційних сталей 20 та сталі 45 (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв).

Аналізуючи графіки, наведені на рис.1, можна зробити висновок про те, що передній кут інструменту суттєво впливає на величину сили різання, а саме при обробленні сталі 20 збільшення кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $15^\circ$  призводить до зменшення сил різання лише на 5%, а при обробленні сталі 45 – взагалі

зменшення сил різання спостерігається лише в неусталеній частині врізання інструмента. Це пояснюється тим, що на етапі врізання ділянка контакту інструмента і заготовки при більших кутах  $\gamma$  є меншою, а отже і менші питомі навантаження. Натомість, при зменшенні кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $0^\circ$  відбувається суттєве зростання сили різання – приблизно на 25% при різанні сталей 20 і 45.

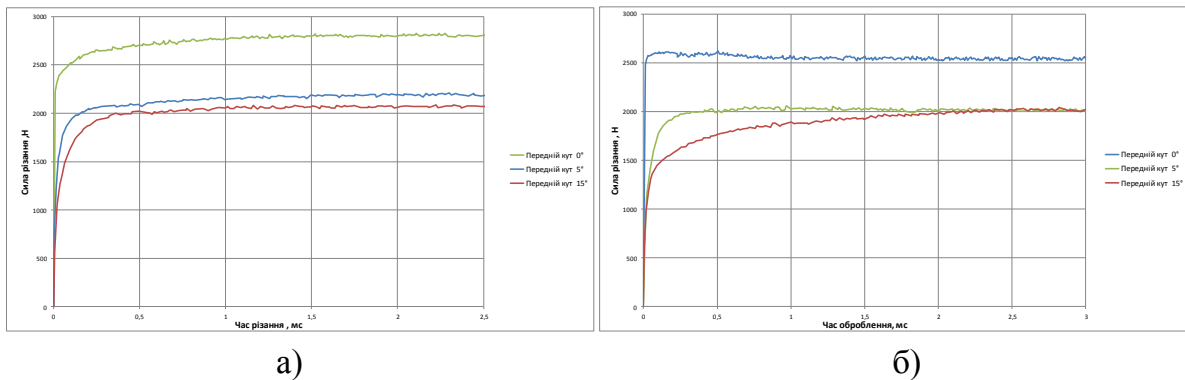


Рисунок 1 – Графіки залежності сил різання від переднього кута  $\gamma$  при обробленні сталі 20 (а) та сталі 45 (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей в системі Deform 2D

З метою аналізу коливань інструмента в поперечному напрямку (перпендикулярному напрямку подачі), проведений аналіз динаміки зміни поперечної складової сили різання, як величини, що найбільше впливає на частоту та амплітуду коливань інструмента [6]. Реологічні дослідження проводились при аналогічних режимах різання (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв), для оброблення заготовки, виготовленої зі сталі 20 інструментом з передніми кутами  $\gamma = -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ .

Аналіз цих графіків дозволив виявити деякі закономірності, що підтверджують та розвивають результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведених проф. Подураєвим В.Н. та проф. Жарковим І.Г. у роботах [4, 6]. Сила  $P_\Sigma$ , що збурює коливання інструмента, формується за рахунок векторної суми реакції сили тертя стружки об передню поверхню інструменту  $P_T$  в зоні стружкоутворення, сили тиску стружкового сегменту на передню поверхню інструмента  $P_f$ , та

сили відтиску інструменту  $P_R$  за рахунок пружної деформації металу на обробленій поверхні заготовки в зоні задньої його поверхні (рис. 3).

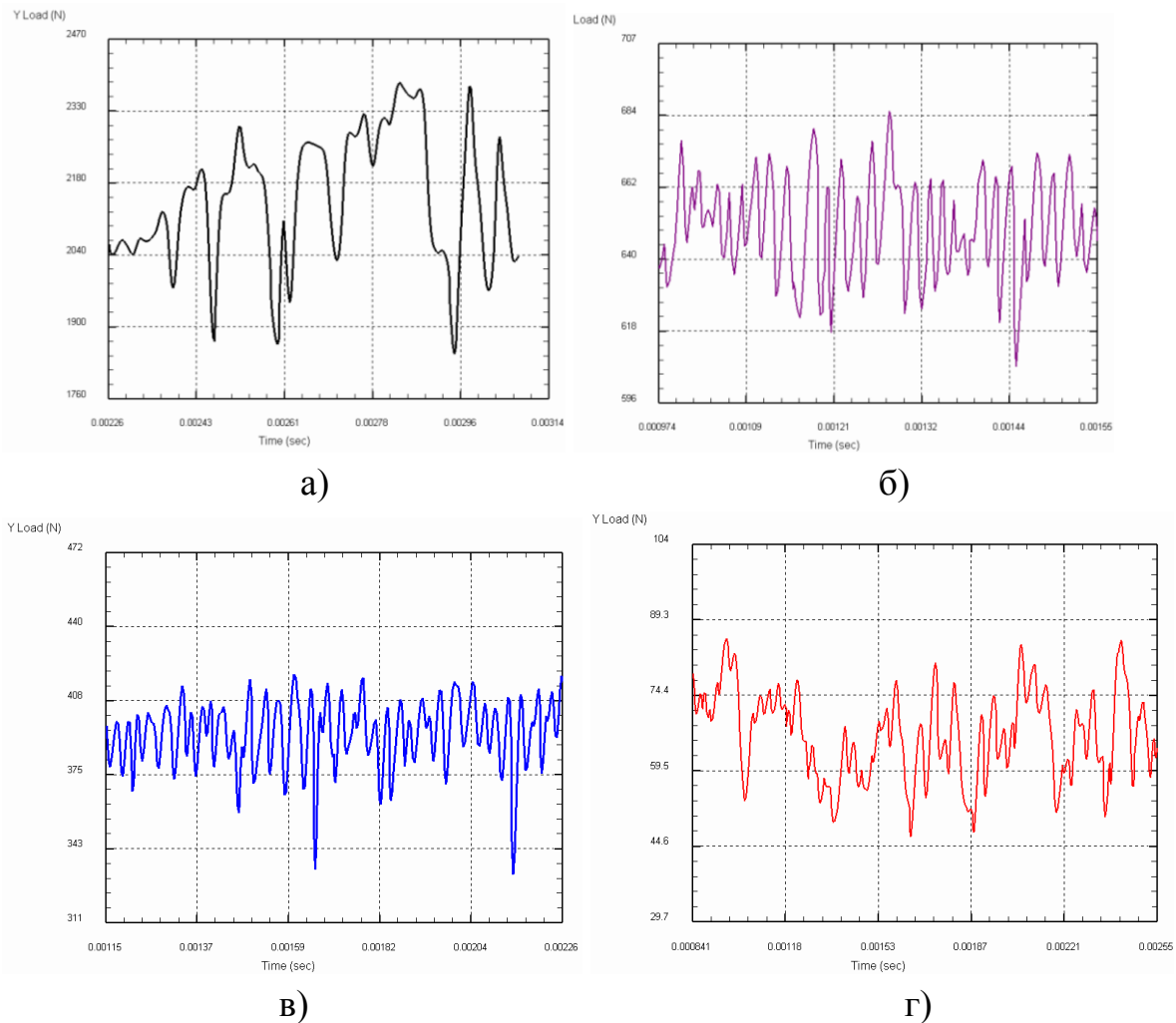


Рисунок 2 – Графіки коливань поперечної складової сил різання при режимах - подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв, для оброблення заготовки, виготовленої зі сталі 20 інструментом з передніми кутами різання  $\gamma = -5^\circ$  (а),  $\gamma = 0^\circ$  (б),  $\gamma = 5^\circ$  (в),  $\gamma = 15^\circ$  (г)

Приводячи проєкції сил на вісь  $Y$  для позитивного переднього кута ( $\gamma > 0$ ), отримаємо:

$$P_{\Sigma} = P_f \cdot \cos \gamma + P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

У випадку негативного переднього кута ( $\gamma < 0^\circ$ ):

$$P_{\Sigma} = P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha - P_f \cdot \cos \gamma \quad (2)$$

А при умові  $\gamma = 0^\circ$ :

$$P_{\Sigma} = P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Якщо прийняти, що задній кут  $\alpha$  різального клина залишається незмінним, то очевидно, що найбільші коливання матимуть місце при умові, що силі тертя стружки об передню поверхню інструменту  $P_T$  будуть протидіяти співнаправлені сила тиску стружкового сегменту на передню поверхню інструмента  $P_f$ , та сила пружного відтиску інструменту  $P_R$ . Тобто, сила тиску стружки на передню поверхню не буде гасити коливання інструмента, викликані динамічною зміною кута зсуву, коливаннями температури в зоні стружкоутворення, дефектами матеріалу, залишковими деформаціями, отриманими від попередніх методів оброблення тощо, а навпаки, буде їх збурювати. Це можливо за умови негативного переднього кута ( $\gamma < 0^\circ$ ) різального клина. У випадку ж позитивного кута ( $\gamma > 0^\circ$ ) – маємо зворотну картину: різальний інструмент попадає у своєрідний клин між стружковим елементом і обробленою поверхнею. Причому дії сил на цих поверхнях є протилежними за напрямком, що і спричинює гасіння коливань інструмента.

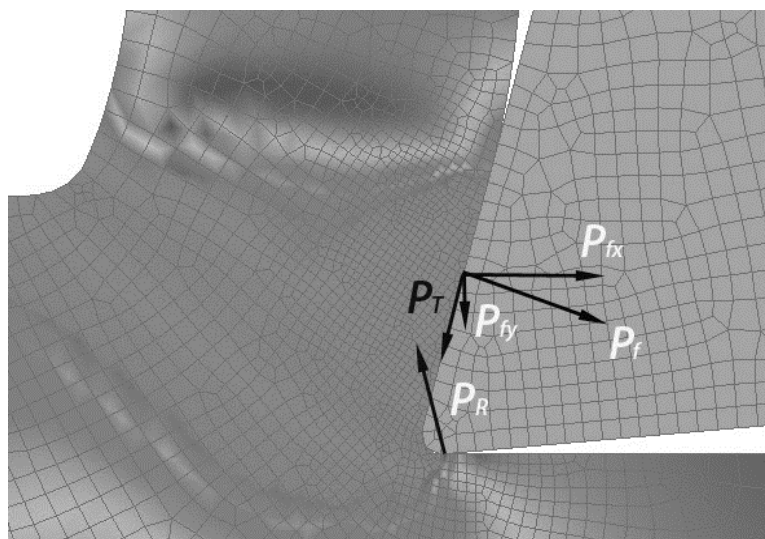


Рисунок 3 – Схема дії сил на передній поверхні інструмента

Аналіз результатів реологічного моделювання цілком підтверджує ці теоретичні викладки. Так, оброблення деталі зі сталі 20 на режимах різання - подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв, при передньому куті інструмента  $\gamma = -5^\circ$  спричинює коливання складової сили різання в межах 280...430 Н (рис.2(а)), при передньому куті інструмента  $\gamma = 0^\circ$  коливання складової сили різання становить лише 40...60 Н (рис.2(б)), при передньому куті інструмента  $\gamma = 5^\circ$  викликає коливання складової сили різання  $\epsilon$  в межах 25...30 Н (рис.2(в)), а при передньому куті інструмента  $\gamma = 15^\circ$  викликає коливання складової сили різання складає лише в межах 5...10 Н (рис.2(г)). Силкові коливання  $\epsilon$  еквівалентом формоутворюючих вібрацій інструмента, що суттєво впливає на точність та шорсткість обробленої поверхні. Більш детально ці питання розкриті у роботі автора [10].

На рис.4 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента  $\gamma$  при обробленні легованої сталі 34Х2Н2М (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв). Аналізуючи залежність силових параметрів від переднього кута інструменти при обробленні легованих сталей, можна спостерігати картину, аналогічну обробленню конструкційних сталей, з тією лише різницею, що вплив зменшення кута  $\gamma$  супроводжується ще більшим зростанням сили різання. Аналогічно зростають і коливання інструменту.

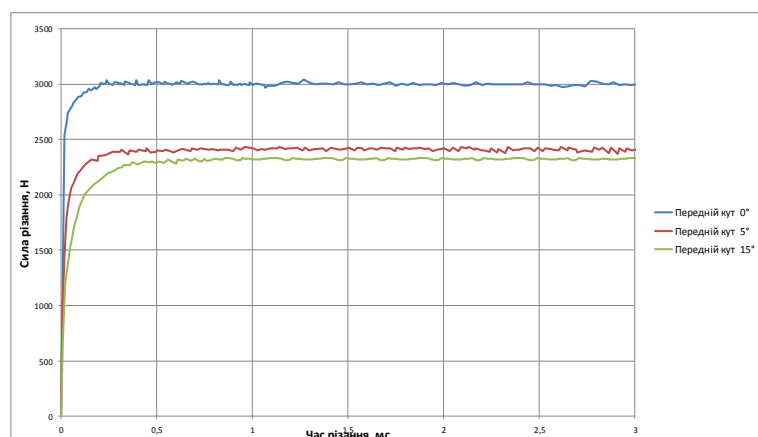


Рисунок 4 – Графік залежності сили різання від переднього кута  $\gamma$  при обробленні легованої сталі 34Х2Н2М, визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

Аналіз графіків впливу переднього кута інструменту на силу різання при обробленні легованої сталі 34X2H2M, наведених на рис.4, дозволяє зробити висновки, що збільшення кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $15^\circ$  призводить до зменшення сил різання лише на 7%, а при зменшенні кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $0^\circ$  відбувається суттєве зростання сили різання – приблизно на 20%.

На рис.5 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента  $\gamma$  при обробленні алюмінієвого сплаву АД33 (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв).

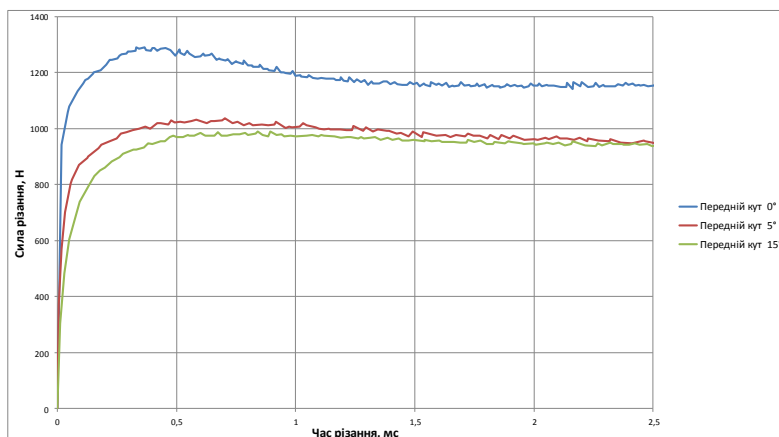


Рисунок 5 – Графік залежності сили різання від переднього кута  $\gamma$  при обробленні алюмінієвого сплаву АД33, визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

Попри аналогію із результатами аналізу впливу переднього кута інструменту на силу різання при обробленні алюмінієвого сплаву з конструкційними та легованими сплавами, в даному випадку спостерігається початкове різке зростання сил різання (до 0,5 мс), і наступне їх вирівнювання (від часу 1,5 мс), як результат подолання енергетичного бар'єру при перетворенні сили пружності у сили пластичного деформування та руйнування. Крім того, можна відзначити, що суттєвого ефекту від збільшення переднього кута, що перевищує значення  $\gamma > 5^\circ$  не спостерігається. Натомість, з літератури [4] відомо, що в цих умовах відбувається активне наростування на передній поверхні інструмента, що вкрай негативно позначається на формуванні мікрорельєфу оброблюваної поверхні. Отже, найбільш ефективний



діапазон використання передніх кутів при обробленні деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, є в межах  $\gamma = 0...5^\circ$ , що цілком корелюється з рекомендаціями [11].

На рис.6 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента  $\gamma$  при обробленні нікелевого жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718<sup>1</sup>) (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв).

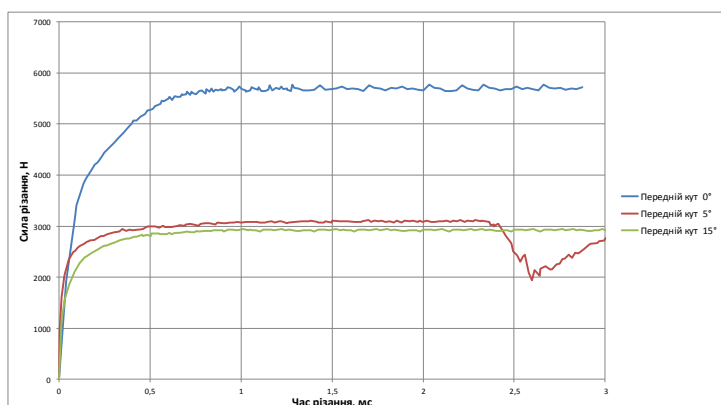


Рисунок 6 – Графік залежності сили різання від переднього кута  $\gamma$  при обробленні жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718), визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

В даному випадку зростання сили різання при зменшенні кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $0^\circ$  є набагато більшим і становить приблизно 45% в зоні усталеного різання. Такий різкий стрибок сили різання можна пояснити тим, що разом із зростанням навантаження стрімко зростає і температура в зоні різання, причому при порівнянні температурних полів при обробленні сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю (режими різання - подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв), можна зробити висновок, що температура в зоні різання жароміцного сплаву на 50% вище від температури при обробленні сталі 20. Таке явище обумовлено, в основному, високим відсотком вмісту нікелю у сплаві. *Мала теплопровідність нікелевого сплаву ХН60Ю* призводить до підвищеної температури в зоні контакту, а отже, до активізації явищ адгезії і дифузії, інтенсивного захоплення контактних поверхонь і руйнування різальної

<sup>1</sup> Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JIS G4051.

частини інструменту. Основою різкого зростання силових чинників є здатність хромонікелевих сплавів зберігати початкову міцність і твердість при підвищених температурах, що призводить до високих питомих навантажень на контактні поверхні інструменту в процесі різання. Сплав ХН60Ю при температурі 20°C має  $\sigma_B=680\dots700$  МПа, а при температурі 800°C  $\sigma_B=610\dots630$  МПа [6]. З наведених даних видно, що міцність цього жароміцного матеріалу зі збільшенням температури до 800°C змінюється мало, тоді як міцність сталі 45 при цій же температурі знижується в 3-5 разів. Це незначне зменшення міцності матеріалу при нагріві в процесі різання призводить до високих питомих навантажень на передню поверхню різальної частини інструменту — від 5000 МПа при великих подачах, і до 9000 МПа при малих, що у декілька разів перевищує ці значення для звичайних конструкційних сталей і відповідає обробленню загартованих сталей з HRC 60...64 [4].

На рис.7 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента  $\gamma$  при обробленні титанового сплаву ВТ6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V) (подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв).

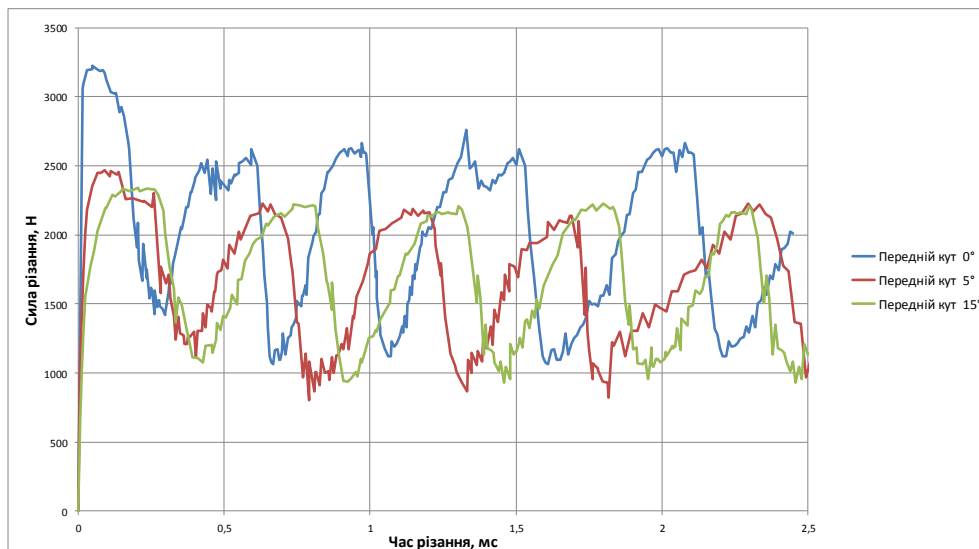


Рисунок 7 – Графік залежності сили різання від переднього кута  $\gamma$  при обробленні титанового сплаву ВТ6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V), визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

В даному випадку не спостерігається значного зростання сили різання в залежності від зменшення переднього кута  $\gamma$  (при зменшенні  $\gamma$  з  $5^\circ$  до  $0^\circ$  сила різання зростає на 15...20%, а при зменшенні  $\gamma$  з  $15^\circ$  до  $5^\circ$  сила різання взагалі практично не змінюється). Проте із збільшенням  $\gamma$  зростає частота утворення зон адіабатичного зсуву. Висока пластичність титанових сплавів призводить до того, що при їх обробленні утворюється зубчастоподібна стружка, що на вигляд схожа на зливну, але має тріщини, які розділяють її на дуже слабо деформовані елементи, міцно пов'язані між собою тонким і сильно деформованим контактним шаром [2]. Утворення такої форми стружки пояснювалося тим, що із зростанням швидкості різання пластична деформація не встигає протікати в основному об'ємі, концентруючись в контактному шарі, де виникають високі тиски і температури. У той же час титанові сплави мають ще меншу теплопровідність, ніж жароміцні сталі і сплави; внаслідок цього при різанні, наприклад, титанового сплаву ВТ6 виникає в середньому в 2,2 рази вища температура, ніж при обробленні сталі 45. Тому температура в зоні різання внаслідок поганої теплопровідності титаномістких матеріалів продовжує залишатися високою, викликаючи тим самим структурні перетворення і активну взаємодію з повітрям [1,8]. В результаті знижених пластичних властивостей титанових сплавів має місце утворення в процесі деформації випереджаючих макро- і мікротріщин. Це пояснює також утворення при різанні титанових сплавів великих кутів зсуву ( $\beta = 38^\circ \dots 44^\circ$ ) з малою усадкою стружки (як правило, коефіцієнт усадки її по довжині близький до одиниці [6,10]).

**Висновки.** Проаналізувавши вплив переднього кута різального клина на реологічні властивості матеріалів, можна зробити висновки, що підтверджують експериментальні дані та розвивають теоретичні положення процесу теорії різання:

Передній кут  $\gamma$  має суттєве значення на формування силових, деформаційних характеристик матеріалів, створення вібрацій різального інструмента, особливо в діапазоні  $\gamma < 5^\circ$ . При обробленні більшості конструкційних та низьколегованих сталей збільшення кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $15^\circ$  призводить до зменшення сил різання лише на 3...5%. Натомість, при

зменшенні кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $0^\circ$  відбувається суттєве зростання сили різання – приблизно на 20...25%.

При обробленні жароміцних сплавів з великим вмістом нікелю, вольфраму, хрому, молібдену, та іншими матеріалами, схильними до утворення інтерметалідних сполук низької теплопровідності, зростання сили різання при зменшенні кута  $\gamma$  від  $5^\circ$  до  $0^\circ$  є набагато більшим і становить приблизно 45...50% в зоні усталеного різання. Такий різкий стрибок сили різання можна пояснити тим, що разом із зростанням навантаження стійко зростає і температура в зоні різання, причому при порівнянні температурних полів при обробленні сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю (режими різання - подача  $S=0,25$  мм; глибина різання  $t=1$  мм; швидкість різання  $V=120$  мм/хв). Таким чином, можна зробити висновок, що температура в зоні різання жароміцного сплаву на 50% вище від температури при обробленні сталі 20.

Вплив зміни переднього кута на силові показники при обробленні титанових сплавів значного зростання сили різання не спостерігається. Наприклад, при зменшенні  $\gamma$  з  $5^\circ$  до  $0^\circ$  сила різання при обробленні сплаву ВТ6 зростає на 15...20%, а при зменшенні  $\gamma$  з  $15^\circ$  до  $5^\circ$  сила різання взагалі практично не змінюється. Проте із збільшенням  $\gamma$  зростає частота коливань зон адіабатичного зсуву, що значно погіршує умови стружкоутворення, сприяє значним вібраційним навантаженням на інструмент і активному зростанню залишкових деформацій на обробленій поверхні.

**Список використаних джерел:** 1. *Stupnytsky Vadym*. Thermal factors influence on rheological state of machining part in chip forming zone // Acta Universitatis Pontica Euxinus, Varna, Bulgaria (Proceeding of IX International Conference “Strategy of quality in industry and education”). - Vol.1.- 2013 – P.136-139. 2. *Армарего И.Дж. А., Браун Р.Х.* Обработка металлов резанием. М.: «Машиностроение», 1977.- 325 с. 3. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. М: Машиностроение, 1975.- 344 с. 4. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. 5. *Криворучко Д.В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы / Д.В. Криворучко, В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012.- 435 с. 6. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов. М.: "Высшая школа", 1974.- 587 с. 7. *Резников А.Н.* Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников.– М.: Машиностроение, 1990.-288 с. 8. *Ступницький В.В.* Исследование адиабатического сдвига стружки при механической обработке титановых и никелевых сплавов на основе анализа

результатов имитационного реологического моделирования в системе DEFORM // Научный (производственно-практический) журнал «Вестник Гродзенскага Дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы», Гродно (Республика Беларусь), 2013, №3(158), Серия 6.- с. 76-86. **9.** *Ступницький В.В.* Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення// Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів».- Львів.- 2012, №730.- С. 125-129. **10.** *Ступницький В.В., Новицький Я.М.* Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні // Машинознавство. — 2013. — №1-2 (187-188).- С.19-22. **11.** *Яцерицын П.И.* Теория резания /*П.И. Яцерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич.* – Минск: Новое знание, 2006.- 512 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Stupnytskyu Vadym.* Thermal factors influence on rheological state of machining part in chip forming zone // Acta Universitatis Pontica Euxinus, Varna, Bulgaria (Proceeding of IX International Conference “Strategy of quality in industry and education”). - Vol.1. 2013 – P.136-139. **2.** *Armarego I. Dzh. A., Braun P.X.* Obrabotka metallov rezaniem. M.: «Mashinostroenie», 1977.- 325 s. **3.** *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezanija metallov. M: Mashinostroenie, 1975.- 344 s. **4.** *Zharkov I.G.* Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom. – L.: Mashinostroenie, 1986. – 184 s. **5.** *Krivoruchko D.V.* Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov: metodologicheskie osnovy / D.V.Krivoruchko, V.A.Zaloga. – Sumy: Universitetskaja kniga, 2012.- 435 s. **6.** *Poduraev V.N.* Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov. M.: "Vysshaja shkola", 1974.- 587 s. **7.** *Reznikov A.N.* Teplovyje processy v tehnologicheskikh sistemah / A.N. Reznikov, L.A. Reznikov.– M.: Mashinostroenie, 1990. -288 s. **8.** *Stupnickij V.V.* Issledovanie adiabaticheskogo sdviga struzhki pri mehanicheskoy obrabotke titanovyh i nikel'nyh splavov na osnove analiza rezul'tatov imitacionnogo reologicheskogo modelirovanija v sisteme DEFORM // Nauchnyj (proizvodstvenno-prakticheskij) zhurnal «Vestnik Grodzenskaga Dzjarzhaŭnaga ŷniversitjeta imja Janki Kupaly», Grodno (Respublika Belarus'), 2013, №3(158), Serija 6.- s. 76-86. **9.** *Stupnic'kij V.V.* Doslidzhennja napruzhenodeformovanogo stanu detalej mashin pid chas ih mehanichnogo obroblennja u zoni struzhkoutvorennja// Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika» «Dinamika, micnist' ta proektuvannja mashin i priladiv».- L'viv.- 2012, №730.- S. 125-129. **10.** *Stupnic'kij V.V., Novic'kij Ja.M.* Matematichne modeljuvan' avtokolivan' rizal'nogo instrumentu ta ihnij vpliv na inzheneriju poverhni // Mashinoznnavstvo. — 2013. — №1-2 (187-188). S.19-22. **11.** *Jashhericyn P.I.* Teorija rezanija /*P.I.Jashhericyn, E.Je.Fel'dshtejn, M.A.Kornievich.* – Minsk: Novoe znanie, 2006. - 512 s.