

УДК658.511.4:621.7

**В. В. Ступницький, Я. В. Долиняк**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## **ІМІТАЦІЙНЕ РЕОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ**

© Ступницький В. В., Долиняк Я.В., 2015

*Наведено імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометрією різального інструмента, на основі досліджень показано вплив різноманітних чинників на реологічну картину процесу різання. Розглянуто вплив механічних властивостей матеріалу, хімічного складу, а також мікроструктури на силові показники у зоні різання.*

*Ключові слова: різальний інструмент, різання, режими оброблення, зона різання.*

*Imitating studies with various materials, processing modes and cutting tool geometry are introduced. Based on research, the influence of various factors on the rheological pattern of cutting process is shown. The influence of mechanical properties of the material, chemical structure and microstructure on power rates in the cutting zone is studied.*

*Key words: cutting tool, cutting, processing modes, cutting zone.*

**Постанова проблеми.** Поняття оброблюваності охоплює сукупність технологічних властивостей матеріалу, що характеризують його вплив на будь-який бік процесу різання. Серед основних характеристик оброблюваності [4] можна відзначити такі, як сила та потужність різання; легкість руйнування і відведення стружки, що визначається величиною її деформації і характером стружкоутворення; можливістю отримання оброблених поверхонь з мінімальною або заданою шорсткістю, глибиною та частотою залишкових деформацій та інших характеристик якості поверхневого шару. Розвиток методів імітаційної інтерпретації динамічних нелінійних процесів різання на основі дослідження результатів реологічного моделювання процесу різання відкрив додаткові можливості для вивчення силових та інших показників у зоні стружкоутворення. Це і визначило можливість і обґрунтованість наведених нижче досліджень.

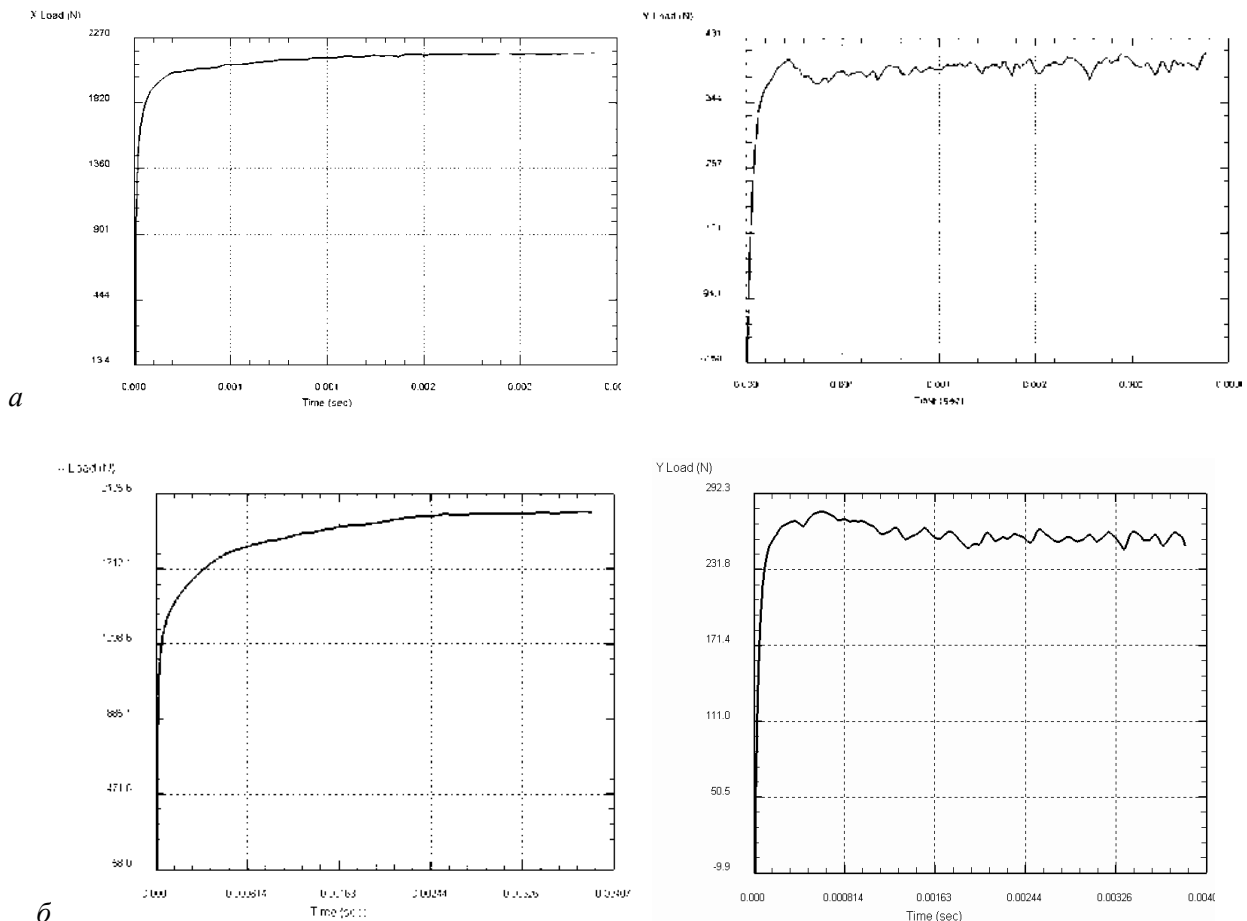
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження процесів різання за допомогою імітаційного моделювання останнім часом набуває все більшого поширення з погляду на те, що важливим є вивчення процесу різання за умов, для реалізації яких оброблювані системи або їх елементи лише створюються, наприклад, для високошвидкісного та надвисокошвидкісного різання, різання інструментами з нових інструментальних матеріалів, з новим покриттям та з новою геометрією різальної частини (леза), оброблення нових або удосконалених конструкційних матеріалів, нанооброблення тощо. Ці завдання можуть бути виконанні за допомогою прогнозуючого моделювання процесів різання.[3]. Використання імітаційного моделювання дає змогу з достатньою точністю зробити розрахунок сил різання, усадження 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 [1, 2].

**Виклад основного матеріалу:**

**1. Реологічна картина оброблюваності конструкційних сталей.**

Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання проведені імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометричними параметрами різального інструменту. Хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура насамперед впливають на оброблюваність сталей та температуру у зоні різання.

На рис. 1 показані графіки сил різання під час оброблення конструкційних сталей 20 та сталі 45 (подача –  $S=0,25$  мм; глибина різання –  $t=1$  мм; швидкість різання –  $V=120$  мм/хв).



*Рис. 1. Складові сили різання сталі 20 (а) та сталі 45 (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей у системі Deform 2D*

Під час оброблення матеріалів з малим вмістом вуглецю (сталь 20 – рис. 1, а) стабілізація сил різання відбувається доволі швидко, приблизно за 1,0 мс. При цьому коливання поперечної сили  $P_x$  є незначними ( $\Delta P_x \approx 30$  Н, що становить приблизно 5–7 % від складової сили різання), тому забезпечення високої якості обробленої поверхні за рахунок керованості режимами різання цілком допустимо. Оптимальним з точки зору забезпечення періоду стійкості інструменту вважають вміст вуглецю у сталі в межах 0,10–0,20 %. Вважається, що наявність у низьковуглецевих сталях ( $C < 0,3$  %) пластинчастого перлиту та дрібних феритних включень істотно підвищує їх оброблюваність.

За підвищення у конструкційній сталі вмісту вуглецю у межах 0,30–0,50 % (що проілюстровано на прикладі оброблення сталі 45 – рис. 1, б) спостерігається зростання часу

стабілізації сил різання у 2,5 раза (до 2,5 мс) та помітне збільшення коливання поперечної сили  $P_x$  ( $\Delta P_x \approx 50$  Н, що становить приблизно 15–17 % від складової сили різання), що істотно ускладнює процес керуваності під час забезпечення високої точності оброблення. Крім того, зниження стійкості інструмента зумовлене появою у мікроструктурі середньовуглецевої сталі абразивних часток цементиту [Ящеріц].

## 2. Реологічна картина оброблюваності легованих сталей.

У легованих низьковуглецевих сталях вплив вуглецю складніший, оскільки це пов'язано з утворенням карбідів різного складу, їх розмірами, твердістю тощо. Наявність в сталі марганцю зміцнює ферит, знижує пластичність сталі і це спричиняє зростання сил різання, що підтверджується аналізом реологічного моделювання під час оброблення легованих сталей (02). За поєднань  $C < 0,20$  % і  $Mn < 1,5$  % процес різання помітно покращується. За високого вмісту марганцю (понад 10 %) сталь має схильність до наклепу під дією сил різання, внаслідок чого різко зростає міцність, знижується пластичність поверхневого шару деталі, по межах зерен утворюються залізомарганцеві карбіди, а аустеніт частково переходить у мартенсит [4]. Оброблюваність у цьому випадку надзвичайно низька. Підвищити її можна за попереднього нагрівання заготовок до температури 400...600 °С, чим анігілюються шкідливі наслідки наклепу. За наявності у сталі деякої кількості сірки у ній утворюються сульфіди марганцю, що відіграють функцію змашування на поверхнях тертя. Фосфор, сірка, свинець використовуються, як присадки, що покращують оброблюваність таких сталей. Зміст кремнію в усіх випадках погіршує оброблюваність сталей внаслідок утворення силікатних абразивних включень. Наявність молібдену, ванадію, хрому, вольфраму підвищує міцність і в'язкість сталей, погіршуючи їх оброблюваність. Ці елементи утворюють тверді розчини із залізом і карбіди різного складу і твердості. Як наслідок, зростає здатність матеріалу швидко зношувати різальну кромку інструмента. Хром, сприяючи коагуляції карбідних часток за відпуску, значно знижує теплопровідність матеріалу. Кобальт, навпаки, уповільнює коагуляцію карбідів, підвищуючи теплопровідність. Він дещо знижує міцність і в'язкість сталей, утворюючи стійку сполуку із залізом. Присутність нікелю у твердому розчині сприяє зміцненню матеріалу деталі, проте знижує оброблюваність сталей (рис. 2, б).

Отже, оброблюваність сталей погіршується зі збільшенням вмісту вуглецю і легуючих елементів, оскільки у цьому випадку збільшується питоме зношування інструменту та температура у зоні різання.

На рис. 2 показані графіки сил різання під час оброблення корозійностійких легованих сталей: сталі 10X17P13M2T (аналог 316h<sup>2</sup>) та 34X2H2M (аналог сталі 4340<sup>1</sup>) (подача –  $S=0,25$  мм; глибина різання –  $t=1$  мм; швидкість різання –  $V=120$  мм/хв).

З аналізу реологічної моделі можна зробити висновки про те, що збільшення вмісту вуглецю в 3,5 раза (для вищенаведеного прикладу оброблення легованих сталей 10X17P13M2T та 34X2H2M) сприяє підвищенню сили різання на 20 % (з 2,05 до 2,5 кН). Крім того, для сталі 10X17P13M2T великий час стабілізації сил різання (3,5 мс) та значні макроколивання складової сили різання  $P_x$  ( $\Delta P_x \approx 80$  Н, що становить приблизно 25–27 % від поперечної складової сили різання) значно погіршують умови якісного оброблення поверхні, спричиняючи автоколивання інструменту. Основна причина цього – наявність у структурі цієї сталі 17 % хрому, що викликає коагуляцію карбідних домішок за відпуску, значно знижує теплопровідність матеріалу, а отже, створює проблеми ефективного теплообміну у зоні різання.

Натомість, для леговоної сталі 34X2H2M стабілізація сил різання настає дуже швидко (приблизно 0,4 мс), коливання складової сили  $P_x$  не перевищують 8–10 %.

<sup>2</sup>Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JISG4051.

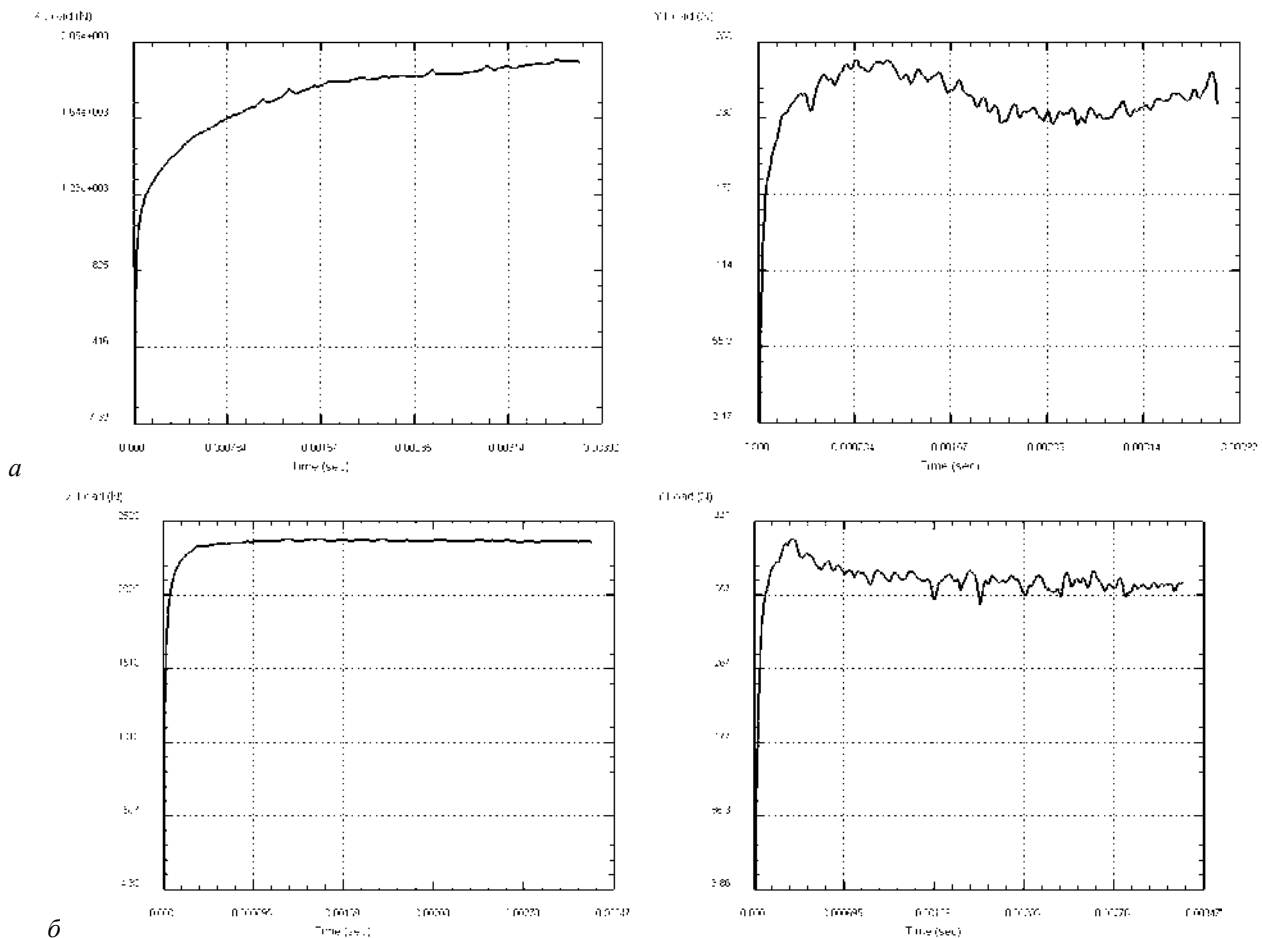


Рис. 2. Складові сил різання легованих сталей 10X17P13M2T (а) та 34X2H2M (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей у системі Deform 2D

### 3. Реологічна картина оброблюваності алюмінієвих сплавів.

Порівняно із сталями алюмінієві сплави мають меншу твердість, нижчий тимчасовий опір і кращу теплопровідність, що значно підвищує швидкість різання і подачу. Проте вибір оптимальних умов оброблення ускладнений через інтегральну дію багатьох чинників. Висока в'язкість багатьох алюмінієвих сплавів спричиняє інтенсивне налипання частинок зруйнованого матеріалу на робочі поверхні різального інструменту. Це утруднює стружкоподрібнення, може викликати пакетування стружки у канавках інструменту і утворення задирів на обробленій поверхні. Під час нагрівання алюміній дуже розширюється (у 2 рази більше, ніж сталь), що перешкоджає досягненню високої точності оброблення під час чистових, а особливо, під час фінішних методів лезового оброблення матеріалів.

Номінальні значення сил різання під час оброблення алюмінієвого сплаву АД33 (Al=95...98 %; Fe до 0,7%; Si=0,4...0,8 %; Mn до 0,15 %; Cr=0,15...0,35 %; Ti до 0,15 %; Cu=0,15...0,4 %; Mg =0,8...1,2 %; Zn до 0,25 %) у 2,2 рази нижчі, ніж під час оброблення конструкційної сталі 20 (0).

Як зазначалось вище, варто брати до уваги й те, що алюмінієві сплави схильні до наростоутворення. Цей процес перебігає від надзвичайно інтенсивного у зв'язку з підвищеною хімічною спорідненістю структурного та хімічного складу алюмінієвих сплавів до матеріалів, що використовуються як інструментальні. Тому максимальна висота наросту і його зникнення відзначаються для алюмінієвих сплавів за порівняно нижчих швидкостей різання, ніж для сталей. Між рівнем сил різання і механічними властивостями алюмінієвих сплавів немає виразної

залежності. Останні чинять складну інтегральну дію на опір металу пластичній деформації під час утворення стружки і на її тертя об передню поверхню інструменту. Загалом під час підвищення міцності сплавів рівень сил різання збільшується. Зв'язок між силами різання і характером мікроструктури алюмінієвих сплавів такий: сила різання вища під час оброблення сплавів з рівномірною структурою, коли вміст твердого розчину кремнію в алюмінії переважає над вмістом евтектики; якщо частки евтектики мають грубішу пластинчасту форму, то сили різання менші. Рівень допустимих швидкостей різання, що забезпечують низьку шорсткість обробленої поверхні і нормативні періоди стійкості, під час оброблення алюмінієвих сплавів у кілька разів вищі, ніж під час оброблення сталей [5].

На 0 показані графіки сил різання під час оброблення алюмінієвого сплаву АД33 ГОСТ 4794-97 (аналог AL6061<sup>3</sup>) (подача –  $S=0,25$  мм; глибина різання –  $t=1$  мм; швидкість різання –  $V=120$  мм/хв). З аналізу графіків складових сил різання можна відзначити незначні коливання складової сили  $P_x$  (до 10 %) і різкий сплеск сил різання на початку врізання інструменту як результат подолання енергетичного бар'єру під час перетворення сили пружності у сили пластичного деформування та руйнування. Для більшості інших конструкційних матеріалів цей ефект зустрічається, проте він не проявляється настільки явно, оскільки значення стабілізованих сил різання у кілька разів вищі.

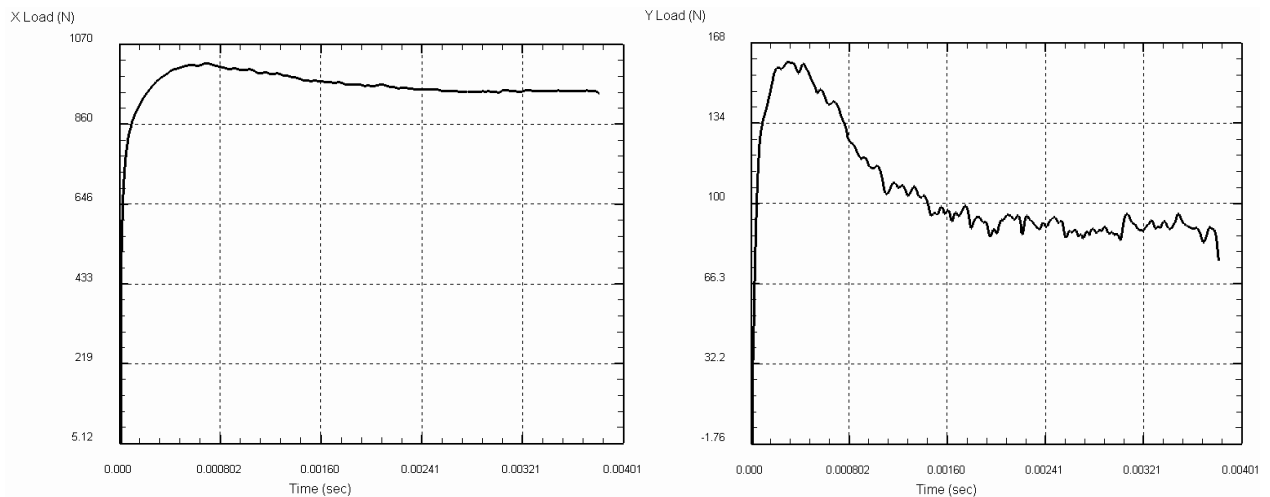


Рис. 3. Складові сил різання алюмінієвого сплаву АД33, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі у системі Deform 2D

#### 4. Реологічна картина оброблюваності жаростійких сталей та сплавів.

За фізико-механічними властивостями жароміцні, жаростійкі і нержавіючі сталі і сплави мають багато спільного, що зумовлює їх технологічні якості. Залежно від хімічного складу і для забезпечення задовільної оброблюваності різанням важкооброблювані сталі і сплави мають різну структуру: феритну, мартенситно-феритну, аустенітну і аустенітно-мартенситну [4]. Гірша оброблюваність жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів порівняно із конструкційними сталями визначається їх фізико-механічними характеристиками, хімічними властивостями, структурою, теплофізичними показниками.

Аналізуючи загальний вплив хімічних елементів на оброблюваність деталей під час різання [4], можна відзначити високе зміцнення матеріалу жароміцних сталей і сплавів у процесі його руйнування різанням. Жароміцні і нержавіючі сталі найчастіше зараховані до сталей аустенітного

<sup>3</sup>Стандарт США ASTM1008, євростандарт EN730-1, стандарт Японії – JISG4032.

класу, що мають кристаліти з гранецентрованою кристалічною ґраткою. Тому сплави аустенітного класу характеризуються низькою межею текучості при цьому самому тимчасовому опорі. Для жароміцних сталей відношення умовної межі текучості, що відповідає 0,2 %-й залишковій деформації до тимчасового опору, становить 0,40...0,45, у той час, як для конструкційних сталей – 0,60–0,65 і більше.

Дослідження мікротвердості коренів стружки показали, що під час оброблення сталі ХН60Ю вона приблизно у 2 рази більша, ніж у недеформованого металу; відносне зміцнення для сплавів хромонікелевих сплавів становить 50...60 %, що значно нижче від цих самих значень під час оброблення середньовуглецевих конструкційних сталей [4].

Жароміцні і нержавіючі сталі і сплави мають низьку теплопровідність порівняно з традиційними для машинобудування конструкційними матеріалами. Під час їх оброблення виділяється значна кількість теплоти, різко зростає рівень температури у зоні різання. Порівнюючи температурні поля під час оброблення 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 у зоні різання жароміцного сплаву на 50 % вища від температури під час оброблення сталі 20 (рис. 4). Це сприяє активізації адгезійних і дифузійних процесів, інтенсифікує зношування робочих поверхонь інструментів.

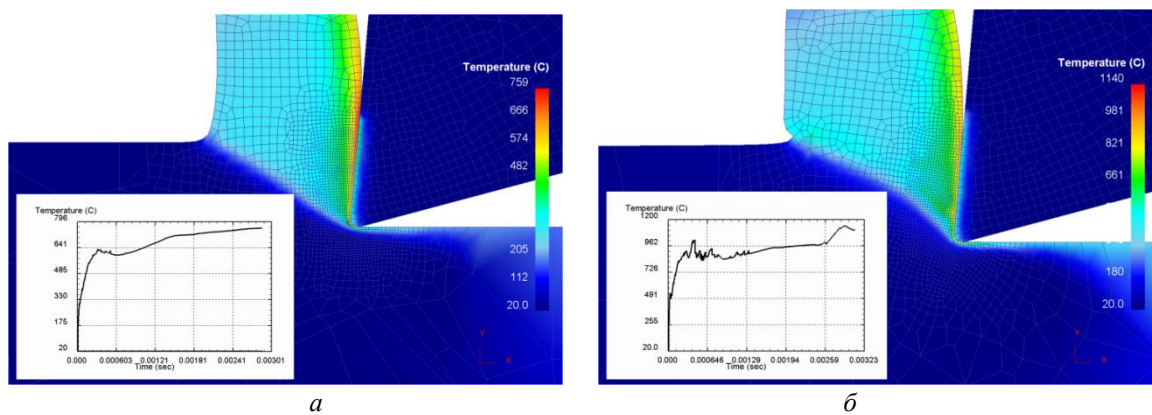


Рис.4. Порівняння температурних полів під час оброблення сталі 20 (а) і жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718<sup>4</sup>) (подача –  $S=0,25$  мм; глибина різання –  $t=1$  мм; швидкість різання –  $V=120$  мм/хв)

Здатність цих матеріалів зберігати початкову міцність і твердість за підвищених температур призводить до того, що в процесі різання інструмент отримує високі питомі навантаження. Так, під час нагрівання сплаву ХН60Ю до температури 700 °С його тимчасовий опір  $s_B = 900...1000$  МПа, а за температури 800 °С –  $s_B = 800...900$  МПа. Своєю чергою, під час нагрівання сталі 45 до цих температур  $s_B$  знижується у 3–5 разів [4]. Дуже слабе розм'якшення жароміцних і нержавіючих матеріалів під час нагрівання до високих температур призводить до того, що на передній поверхні різального інструменту діють високі питомі навантаження (до 7000...11000 МПа) (рис. 4), що відповідають навантаженням, які виникають під час оброблення загартованих конструкційних сталей з 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 та інструментального матеріалів викликає їх прихоплювання і навіть руйнування контактних ділянок. Найбільшою здатністю до адгезії наділені метали, що мають підвищену пластичність, з атомними діаметрами, що розрізняються не більше ніж на 15...18 % (наприклад, залізо – хром, залізо – мідь) [4].

<sup>4</sup>Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JISG4051.

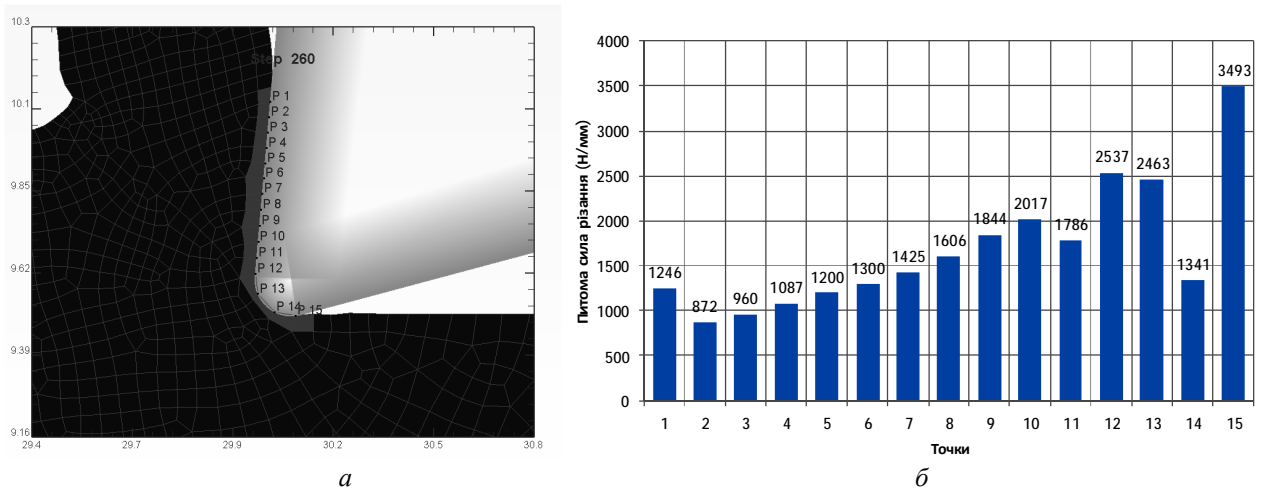


Рис. 5. Хромографічна картина моделювання (а) та графічна інтерпретація (б) питомого навантаження на передню поверхню інструмента (по базових точках) під час оброблення жароміцного сплаву XH60Y

Велика стираюча здатність жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів зумовлена наявністю у них фазових станів, коли утворюються інтерметалідні або карбідні включення. Останні подібно до абразиву сприяють посиленому зношуванню інструменту. У процесі пластичної деформації жароміцних і нержавіючих матеріалів відбувається виділення карбідів, твердість яких наближається до твердості твердих сплавів вольфрамо-кобальтових та титано-кобальтових груп. Внаслідок цього різко зростає абразивна здатність жароміцних сплавів, особливо тих, що мають не нікелеву основу. Для таких матеріалів властивий значний розкид розмірів зерен, а також нерівномірність виділення карбідів та інтерметалідної фази після їх кування, штампування і особливо литва. Наявність таких зон призводить до різкого зростання сил різання і температури, що значною мірою зумовлює затуплення і руйнування різальних кромки інструмента.

Враховуючи розглянуті особливості, фізичну суть процесу різання нержавіючих і жароміцних матеріалів можна звести до такого [Ящеріц+11]. Спочатку інструмент врізається у незміцнений метал, і під його дією відбувається пластична деформація шару металу, що супроводжується поглинанням енергії, яка прикладається ззовні; зрізаний шар металу при цьому зміцнюється і стає крихким. Потім відбувається діатермічний зсув і утворення елемента стружки. Внаслідок малої теплопровідності оброблюваного матеріалу теплота різання концентрується у зоні зняття стружки і сприяє активізації процесів адгезії і дифузії, викликаючи руйнування різальних лез інструменту. Вказані явища разом з підвищенням абразивних і механічних властивостей нержавіючих і жароміцних матеріалів за високої температури, а також змінна дія цих чинників, зумовлена вібраціями, інтенсифікують процес зношування різальних інструментів. Ці особливості жароміцних і нержавіючих сталей і 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 обробленням звичайної конструкційної сталі 45. При цьому в 1,5 раза зростають сили різання ( $P_x = 2120$  Н – для сталі 45 (рис. 3.6);  $P_x = 3240$  Н – для сплаву XH60Y (рис. 6)), що є причиною вищих температур у зоні різання, а також невеликих періодів стійкості різального інструменту.

На рис. 6 показані графіки сил різання під час оброблення нікелевого жароміцного сплаву XH60Y (аналог IN 718<sup>5</sup>) (подача –  $S=0,25$  мм; глибина різання –  $t=1$  мм; швидкість різання –  $V=120$  мм/хв).

<sup>5</sup>Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JISG4051.



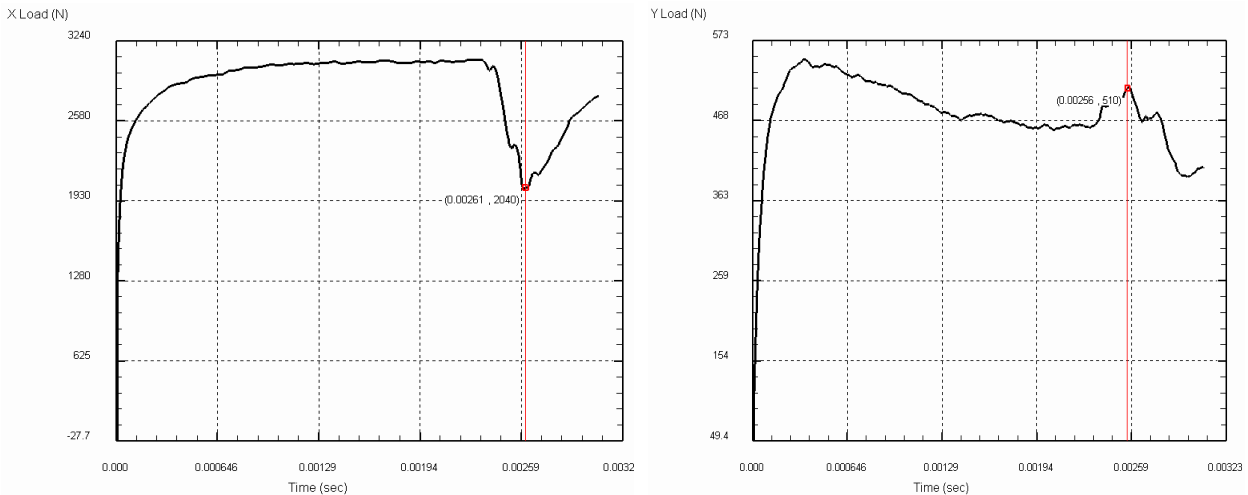


Рис. 6. Складові сил різання жароміцного сплаву ХН60Ю, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі у системі Deform 2D

Поява на 2,6 мс різкого стрибка сили різання викликана викривленням зовнішньої сторони стружки під впливом адіабатичних зсувних явищ (детально описані нижче), що призводить до зміни кута зсуву та усадження стружки. У динаміці процес зародження і розвитку надлому стружки під час оброблення жароміцного сплаву ХН60Ю показаний на рис. 7.

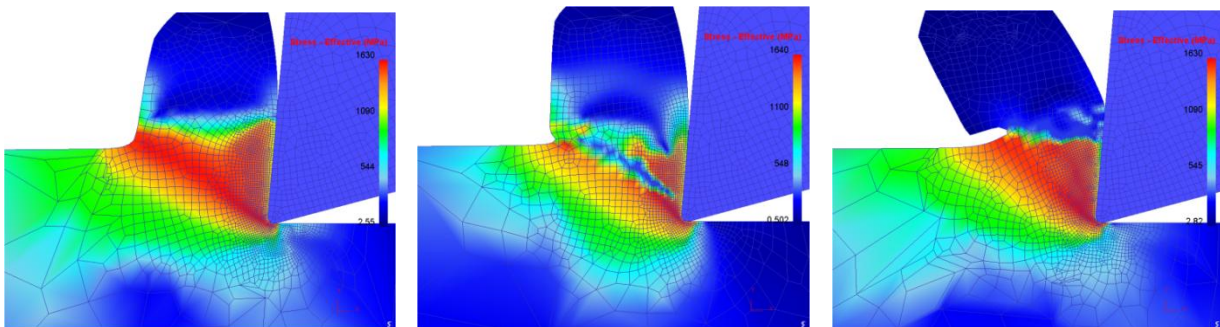


Рис. 7. Процес утворення надлому стружки під час оброблення жароміцного сплаву ХН60Ю (у динаміці)

**Висновки.** Використовуючи можливості реологічного моделювання, можна з достовірністю прогнозувати усі значущі складові сили різання з врахуванням не тільки режимів різання, але й геометрії різального леза. У результаті імітаційного моделювання реологічного стану заготовки під час різання встановлено закономірності зміни сили різання для різних конструкційних матеріалів. Встановлено, що під час порівняння оброблюваності сталі 20 та сталі 45, збільшення вуглецю спричиняє зростання часу стабілізації сил різання у 2,5 раза та помітне збільшення коливання поперечної сили  $P_x$ , що істотно ускладнює процес керованості за забезпечення високої точності оброблення. Під час оброблення легованих сталей зі збільшенням кількості вуглецю, спостерігається також збільшення складових сил різання, крім того, для сталі 10X17P13M2T великий час стабілізації сил різання та значні макроколивання складової сили різання  $P_x$  значно погіршують умови якісного оброблення поверхні, спричиняючи автоколивання інструменту, що, своєю чергою, впливає на якість обробленої заготовки. Під час оброблення жароміцних сплавів виділяється велика кількість теплоти, різко зростає рівень температур у зоні різання. Порівнюючи температурні поля під час оброблення сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю, можна зробити



висновок, що температура у зоні різання жароміцного сплаву на 50 % вища від температури під час оброблення сталі 20. На реологічній картині оброблення цих сплавів спостерігаються стрибки сил різання. Це пояснюється надломом стружки під час оброблення.

1. Криворучко Д. В. *Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы* / Д. В. Криворучко, В. А. Залога. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 435 с. 2. 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. 3. Криворучко Д. В. *Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01* Д. В. Криворучко. – Харків, 2010. – 38 с. 4. Ящерицын П. И. *Теория резания* / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с. 5. Бобров В. Ф. *Основы теории резания металлов* / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.