

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОПУТНОГО І ЗУСТРІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ У СИСТЕМІ ADVANTEDGE

© Ступницький В. В., 2018

Наведено результати досліджень напружено-деформованого стану заготовки під час попутного та зустрічного фрезерування. Проаналізовано вплив методу оброблення на формування силових та термодинамічних параметрів різання для різномірних конструкційних матеріалів. Для моделювання використано програмний комплекс AdvantEdge. Це сучасний комплекс програмного забезпечення на основі методу кінцевих елементів, який використовується для дослідження процесів різання металу. AdvantEdge має повний комплект для аналізу, зокрема формування профілю стружки, температури, напружено-деформованого стану інструменту та заготовки. У програмне забезпечення вбудовано підсистему імітаційного моделювання та аналізу результатів досліджень, що дає змогу отримати результати силового та термодинамічного стану заготовки та інструменту без складних експериментальних досліджень.

Ключові слова: попутне фрезерування, зустрічне фрезерування, реологічне моделювання, метод скінченних елементів, програмний продукт AdvantEdge, напружено-деформований стан, режими різання, термодинамічний стан заготовки та інструмент.

The results of workpiece stress-strain state investigations during up (conventional)-milling and down (climb)-milling are given. The influence of the machining method's type on the formation of loading and thermodynamic cutting parameters for heterogeneous materials is analyzed. Software AdvantEdge was used for simulation. AdvantEdge is the modern Finite Element Analysis (FEA) product used to research the metal cutting processes. AdvantEdge has a complete possibilities for analysis, including the formation of a shaving profile, a temperature, a stress-strain state with the tool and machined workpiece. The software includes a built-in subsystem for the simulation and analysis of the research's results of the workpiece machining and tool loading power and thermodynamic condition without difficult experimental testing.

Key words: up (conventional)-milling, down (climb)-milling, rheological simulation method, Finite Element Analysis (FEA), AdvantEdge software, stress-stain state, cutting modes, thermodynamic state of the workpiece and tool.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку науки про різання матеріалів саме реологічне моделювання процесів формоутворення методом скінченних елементів є важливим інструментом дослідження напружено-деформованого стану оброблюваної поверхні та інструментів. Особливо складними завданнями моделювання є аналіз процесів різання, що підлягають неусталеним навантаженням та випадковим збуренням силового режиму оброблення (таких як зубообробка, профільне фрезерування, тангенціальне точіння тощо), а також етапи таких стохастичних процесів, як врізання і вихід інструменту [4, 5, 7]. Отже, важливим дослідницьким

завданням є створення рекомендацій щодо вибору та аналізу результатів моделювання нестационарних процесів різання із високою продуктивністю і достатньою похибкою прогнозування динамічних, силових, напружено-деформаційних та температурних чинників формоутворення складнопрофільних поверхонь деталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тему та напрям дослідження зустрічного та попутного фрезерування, їхні переваги та недоліки розглянуто у багатьох літературних джерелах [1, 6–10].

Зустрічне фрезерування (conventional milling), яке часто також називають традиційним, реалізується у тому випадку, коли швидкості різання і рух подавання заготовки є різноспрямованими (рис. 1, а [2]).

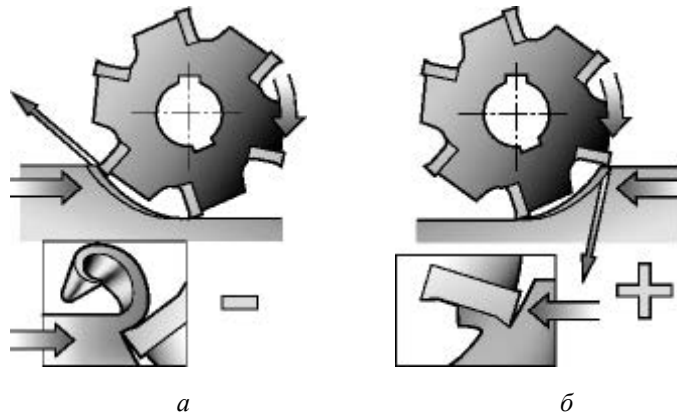


Рис. 1. Схема зустрічного (а) та попутного (б) фрезерування

Під час врізання фрези товщина стружки постійно зростає і на виході стає максимальною. Тому під час зустрічного фрезерування, коли пластина лише виконує роботу знімання стружки мінімальної товщини, виникають високі сили тертя, які сприяють відтисканню фрези від заготовки. Очевидно, що в такий період врізання зуба процес різання більше нагадує вигладжування, що супроводжується високим температурним режимом, зумовленим підвищеним тертям інструменту, заготовки та стружки [2]. Це явище сприяє істотному зміцненню поверхневого шару деталі. Під час виходу інструменту із заготовки внаслідок того, що припиняється знімання великої товщини стружки, відбувається динамічний удар, що призводить до викривування і значної втрати стійкості інструменту. Тому високі розтягувальні напруження, що виникають на виході кромки з різання, можуть стати причиною швидкої поломки пластини [1]. Під час фрезерування стружка налипає на різальне лезо фрези і перешкоджає її роботі в наступний момент різання. Під час зустрічного фрезерування це може призвести до заклинювання стружки між пластиною і заготовкою.

Переваги цього методу фрезерування зумовлені передусім тим, що навантаження на заготовку є плавнішим незалежно від її конфігурації, тобто процес різання відбувається рівномірніше. За рахунок деформації поверхневого шару заготовки відбувається зміцнення обробленої поверхні, що також можна вважати позитивним чинником.

Проте у [2] відзначено й деякі недоліки такого методу оброблення, а саме: сили різання під час зустрічного фрезерування намагаються відірвати заготовку від затискного пристрою, що спричиняє вимогу її надійнішого її закріплення в пристосуванні. Крім того, спостерігається швидке зношування різального леза, що, своєю чергою, не дає змоги працювати із застосуванням високих режимів різання.

Для зустрічного фрезерування характерне досить ускладнене видалення стружки, що вилітає перед фрезою і може потрапити в зону різання, а відтак може призвести до появи подряпин на обробленій поверхні. Оскільки за такого фрезерування стружка налипає на лезо інструменту і

перешкоджає її роботі в наступний момент врізання, це може спричинити заклинювання стружки між пластиною і заготовкою, що призведе до пошкодження пластини. Попутне фрезерування дає змогу уникнути таких ситуацій. У випадку, коли припуск розподілений нерівномірно, зустрічне фрезерування ефективніше. Використовуючи керамічні пластини для оброблення жароміцних сплавів, рекомендується вибирати зустрічне фрезерування, що пов'язано з підвищеною чутливістю керамічних пластин до удару під час входження фрези в зону врізання [6].

Попутне фрезерування (climb milling), або так зване фрезерування за подачею [3], – це метод оброблення, за якого напрямки руху заготовки і вектора швидкості різання є односпрямованими (рис. 1, б). Очевидно, що у такому разі товщина стружки на початку різання є найбільшою і поступово зменшується на виході. У разі попутного фрезерування умови початку роботи різальної пластини врізання сприятливіші порівняно із зустрічним фрезеруванням. Зазначимо, що цим способом оброблення можна забезпечити кращий температурний режим роботи і *можливість зміцнення поверхневого шару заготовки*. Сили різання за такого методу оброблення притискають заготовку до базової деталі пристрою, а пластини – в гнізда корпусу, сприяючи їх надійнішому закріпленню [3]. Попутне фрезерування вважається ефективнішим за умови, коли жорсткість обладнання, закріплення і сам оброблюваний матеріал дають змогу застосовувати цей метод.

Проте, якщо верстат забезпечений компенсаційним пристроєм, то попутне фрезерування має перевагу над зустрічним, оскільки забезпечує вищу чистоту оброблюваної поверхні й дає змогу працювати на підвищених швидкостях.

Отже, переваги попутного фрезерування можна узагальнити такими чинниками: завдяки тому, що сили різання спрямовані в напрямку заготовки, немає необхідності застосовувати складні затискові пристрої та позбавляти заготовку усіх ступенів вільності; стійкість фрези за цим методом фрезерування є набагато вищою, ніж у разі зустрічного фрезерування, оскільки зношування зубів інструменту по задніх поверхнях менш значне і відбувається рівномірніше. Крім того, можна відзначити кращу якість оброблених поверхонь як результат плавної деформації припуску металу.

Щодо недоліків попутного фрезерування треба передусім вказати на складність *використання цього способу оброблення заготовок з необробленими поверхнями (таких як поковки, виливки, штампівки тощо)*. Це зумовлено тим, що різноманітні включення з різними міцнісними характеристиками можуть спричинити суттєве зношування інструменту або навіть призвести до його руйнування [1]. Іншим істотним недоліком є те, що зуби фрези працюють за ударного навантаження, що спричиняє вібрації деталі та інструмента, вимагає підвищеної жорсткості технологічної системи ВПД для досягнення точності та якості поверхневого шару деталі. У механізмах переміщення стола не повинно бути зазорів, щоб унеможливити появу вібрацій. Тому на сучасних верстатах з ЧПК, які мають високу жорсткість, вібростійкість і у яких відсутні люфти в з'єднаннях типу “ходовий гвинт-гайка”, застосовують переважно попутне фрезерування.

Цікаво проаналізувати дію сил різання під час фрезерування зубів зубчастого колеса модульною черв'ячною фрезою зустрічним та попутним методом, що описано в [6, 9]. Під час переміщення–опускання супорта зверху виконується зустрічне фрезерування, тобто під час обертання фрези її різальні леза рухаються від торця з нарізаною частиною зубців до торця заготовки з необробленою частиною, тобто назустріч оброблюваному шару металу (рис. 2, а).

Під час переміщення супорта вгору відбувається попутне фрезерування. В цьому випадку зуби фрези рухаються щодо заготовки в напрямку від торця з ненарізаною частиною зубів до торця з нарізаною, тобто у одному напрямку зі зрізаним шаром металу (рис. 2, б).

Силу різання фрези R , перпендикулярну до поверхні зубців інструменту, можна розділити на два напрямки: на горизонтальну складову R_x і вертикальну складову R_y . Під час зустрічного фрезерування горизонтальна ця сила діє на фрезу в напрямку від її осі (рис. 2, в) і здійснює відтискання супорта від напрямних, зменшуючи стійкість фрези.

Під час попутного фрезерування відбувається зворотна картина: горизонтальна сила діє на фрезу у напрямку до її осі та притискає супорт до напрямних. Очевидно, що при цьому зростає стійкість фрези, що сприяє покращенню точності оброблення, забезпечуючи можливість роботи на підвищених швидкостях різання.

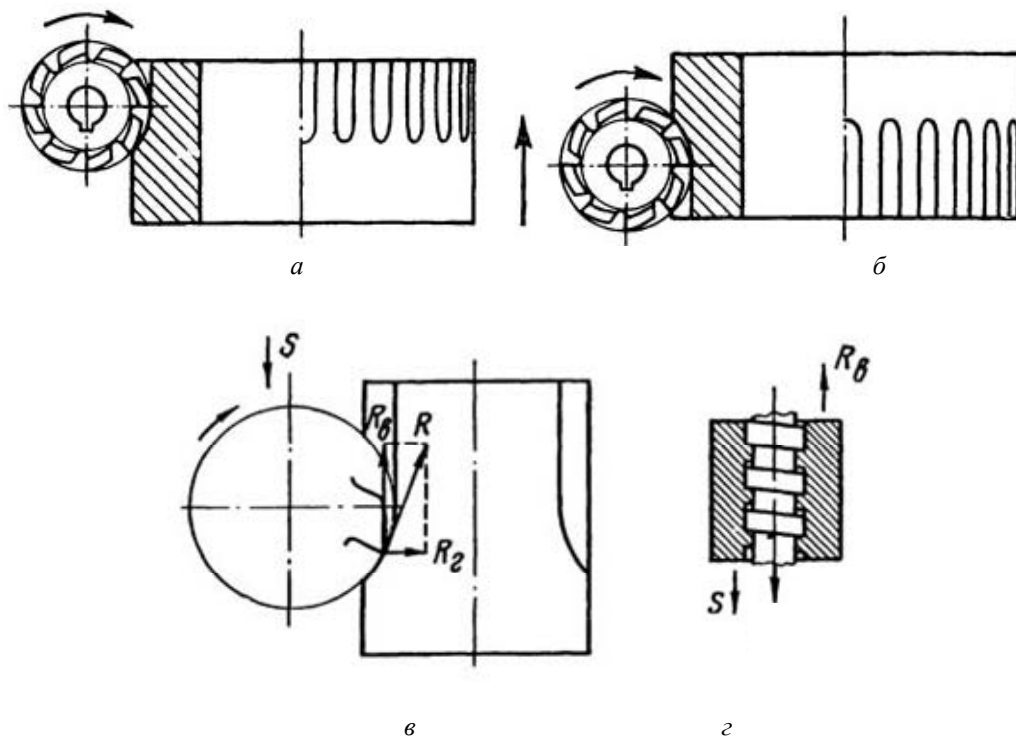


Рис. 2. Схема дії сил різання під час фрезерування

Під час зустрічного фрезерування гвинт, що опускається, натискає на верхні гайки супорта і тому вертикальна сила спрямована проти напрямку подання, притискаючи витки гайки до витків гвинта. У результаті зменшуються зазори у з'єднанні "гвинт-гайка" і фреза працює з рівномірнішим поданням без вібрацій. Під час попутного фрезерування гвинт, що переміщає супорт вгору, натискає на нижні гайки, а напрямок вертикальної сили стає співспрямованим із напрямом подачі. У момент врізання зубів фрези вертикальна сила зростає ($R_v > S$) і відтискає витки гайки від гвинта за рахунок зазору між ними. Це сприяє вібрації супорта, створює нерівномірну подачу, внаслідок чого суттєво погіршуються умови різання. Для конструктивного усунення цього недоліку в механізмі переміщення супорта застосовують різноманітні пристрої, що примусово притискають гайку до гвинта (компенсаційні гайки, противаги, гідравлічні системи).

Отже, саме коливання системи ВПД можуть системно вплинути на формування параметрів якості оброблюваної поверхні. Результати досліджень, проведених під керівництвом проф. Ю. М. Внукова та проф. І. Є. Гриця [6, 8], свідчать про те, що у разі збільшення швидкості обертання шпинделя істотно збільшується і розмах вільних згасаючих коливань перед врізанням зуба фрези в деталь. І на високих швидкостях фрезерування ця величина може досягати 40 % припуску, що великою мірою може сприяти погіршенню якості та точності обробки. За таких умов обробки необхідно забезпечувати мінімальний розкид точки врізання, точно підбираючи частоти обертання шпинделя. Частина поверхні різання, що залишилася від попереднього проходу зуба, формує рельєф поверхні й називається ділянкою профілювання рельєфу (або зоною профілювання). Рівень коливань на цій ділянці характеризує якість обробленої поверхні. Під час зустрічного фрезерування виродження коливань настає за менших частот обертання шпинделя порівняно з попутним. Також розмах автоколивань в зоні профілювання є більшим (приблизно на 30 %) за зустрічного фрезерування. Це одні з характерних відмінностей попутного і зустрічного фрезерування.

Мета та постановка завдання досліджень. Узагальнюючи наведений вище аналіз різних методів фрезерування, зазначимо, що більшість висновків про їх ефективність ґрунтується на апіорних та часто суперечливих твердженнях. Натомість експериментальні дослідження щодо переваг зустрічного та попутного фрезерування обмежені вихідними даними і можуть бути суб'єктивно трактовані. Тому важливим науковим завданням є комплексний аналіз силового та термодинамічного стану заготовки в результаті різних методів фрезерування, який можна найкраще реалізувати засобами реологічного моделювання процесу різання в одній із САЕ-систем [4, 5, 10].

Методика досліджень напружено-деформованого стану заготовки на основі реологічного моделювання процесу зустрічного та попутного фрезерування у системі AdvantEdge

Напружено-деформований стан лезового інструменту є пружним і за умови розрахованих силових чинників обробки може бути достатньо точно розрахований з необхідною точністю на основі відомих методик [4]. Проте для аналізу контактних напружень заготовки необхідно також проаналізувати напружено-деформований стан в умовах пластичної деформації та руйнування як результат перевищення запасу пластичності матеріалу заготовки. Отже, в заготовці під час механічного оброблення виникає локальне джерело напруження, що суттєво перевищує межу текучості. Зона пластичності під час різання складна з нерівномірним розподілом напруження, швидкостей деформацій і температури, і аналітичному опису практично не підлягає.

Сучасні системи інженерного аналізу, що реалізують метод скінченних елементів (Finite Element Analysis (FEA)), дають змогу визначати поля напружень і деформацій у пружній і пластичній областях, а також досліджувати контактну взаємодію двох і більше тіл [5]. Це дає змогу виконувати інтегрований розрахунок напруженого стану інструменту і заготовки при різанні. Сьогодні в машинобудуванні застосовують багато різних САЕ-систем – як універсальних (ANSYS, MSC. Nastran, CosmosWorks тощо), спеціалізованих (QForm, LS-Dyna, AdvantEdge, DEFORM тощо).

Для вирішення поставленого завдання використано сучасний комплекс програмного забезпечення AdvantEdge, розроблений компанією Third Wave Systems (USA) й оснований на методі скінченних елементів (FEA). Цей програмний продукт використовується для дослідження процесів формоутворення (різання) металу. AdvantEdge має повний комплект 2D та 3D аналізу процесу різання, зокрема формування профілю стружки, температури, напружено-деформованого стану на інструменті та заготовці. Програмне забезпечення містить вбудовану бібліотеку конструкційних та інструментальних матеріалів, підсистему імітаційного моделювання, аналітичного та анімаційного аналізу результатів досліджень, що дає змогу отримати результати силового та термодинамічного стану заготовки та інструменту без проведення складних експериментальних досліджень.

AdvantEdge доступно ескізне моделювання, експорт та імпорт геометрії, зміна геометричних параметрів об'єктів і положення у просторі, гнучке налаштування параметрів сітки (розмір елементів, інтенсивність, згущення, тип елементів тощо), автоматичне накладення сітки з оптимізацією під форми і розміри об'єкта, додавання нових параметрів у готові матеріали з бібліотеки, створення нового матеріалу та занесення у бібліотеку. Система має простий інтуїтивний інтерфейс, в якому реалізована напівавтоматична система накладення зв'язків між об'єктами з налаштуванням властивостей контакту (сила тертя, температура в зоні зіткнення та інші). Під час розрахунку реалізується повний контроль параметрів розрахунку (час всього процесу, крок розрахунку, кінетична енергія у вибраних вузлах тощо). У програмному комплексі AdvantEdge реалізовані ефективні методи розв'язання перелічених задач, серед яких явний (explicit) і неявний (implicit) методи скінченних елементів, багатоконпонентна гідродинаміка (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics), обчислювальна гідродинаміка нестискуваних потоків, безсітковий метод згладжених ґраток (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics), безсітковий метод, оснований на методі Гальоркіна (EFG – Element Free Galerkin method) тощо.

Процес побудови моделі для імітаційного моделювання в системі AdvantEdge передбачає такі етапи [10]:

- вибір типу задачі (Process type – Up Milling or Down Milling).

Інтерфейс системи розрахунку виглядатиме так:

- створення геометрії: специфіка AdvantEdge полягає у переміщенні моделей незалежно від вибраної системи координат (не мають прив'язки до неї);
- задання матеріалу заготовки та корекція фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу відповідно до вітчизняних стандартів;
- згідно з поставленим завданням на проектування досліджуватимуться процеси зустрічного та попутного фрезерування заготовок із найрепрезентативніших машинобудівних матеріалів: конструкційної сталі, гартованої сталі, чавуну та легованої (нержавіючої) сталі;
- накладення сітки: AdvantEdge має гнучке налаштування параметрів сітки;
- формулювання граничних умов: система має здатність накладення граничних умов в автоматичному режимі, змінюючи параметри умов під процес моделювання;
- задання геометричних параметрів різального інструменту;
- вибір параметрів різання та апроксимація зміни припуску на фрезерування відповідно до класу задачі (Process type – Up Milling or Down Milling).

У програмних продуктах AdvantEdge обчислення відбувається в автономному режимі з візуальним відображенням його ходу.

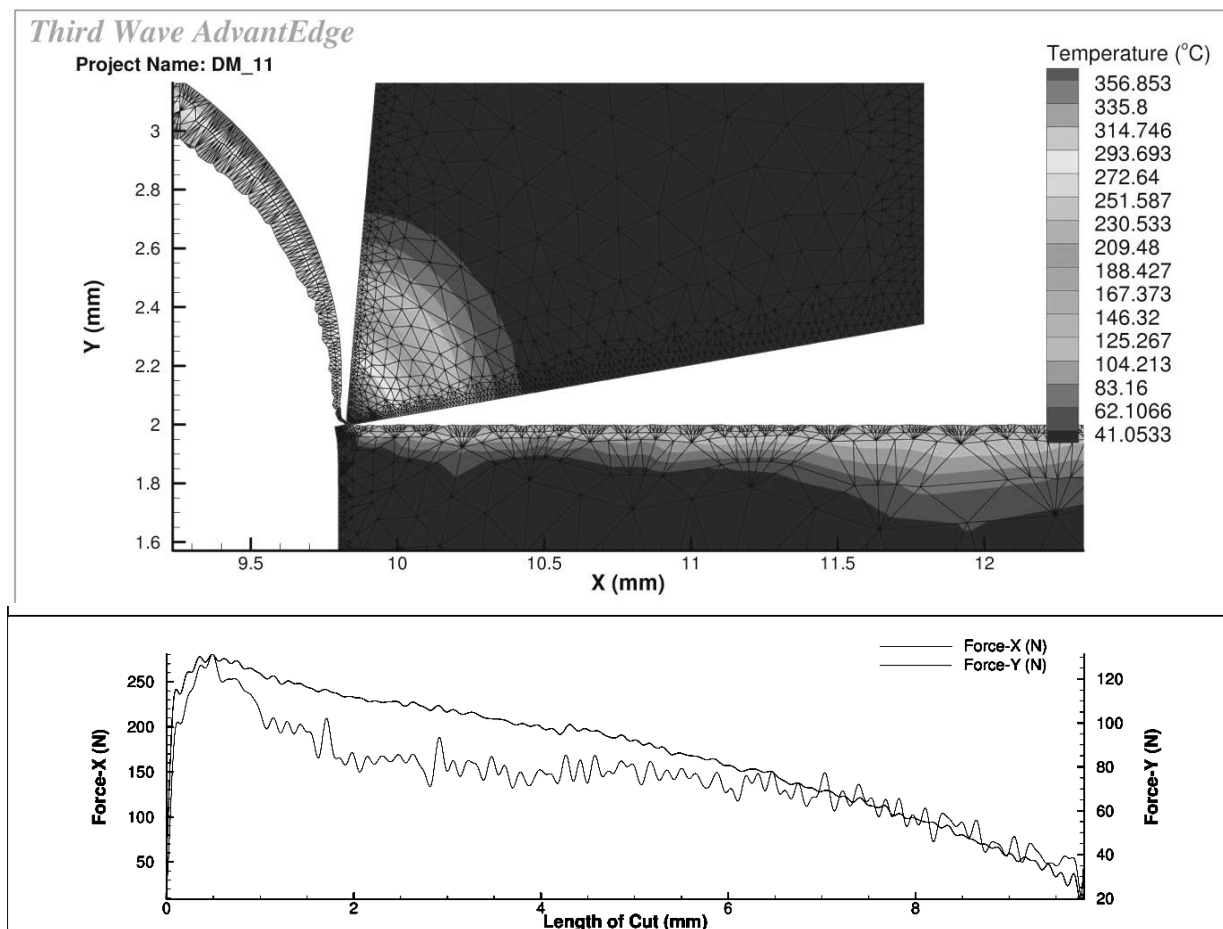


Рис. 3. Приклад моделювання процесу попутного фрезерування деталі в системі AdvantEdge

**Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану заготовки
на основі реологічного моделювання процесу зустрічного
та попутного фрезерування в системі AdvantEdge**

Згідно з поставленим завданням досліджено процеси зустрічного та попутного фрезерування заготовок з конструкційної сталі AISI 1040, гартованої сталі AISI 8617-H (HRC 46), чавуну ASTM A-48, легваної сталі 316h.

Як приклад можна навести аналіз моделі попутного фрезерування заготовок з конструкційної сталі (аналог AISI 1040).

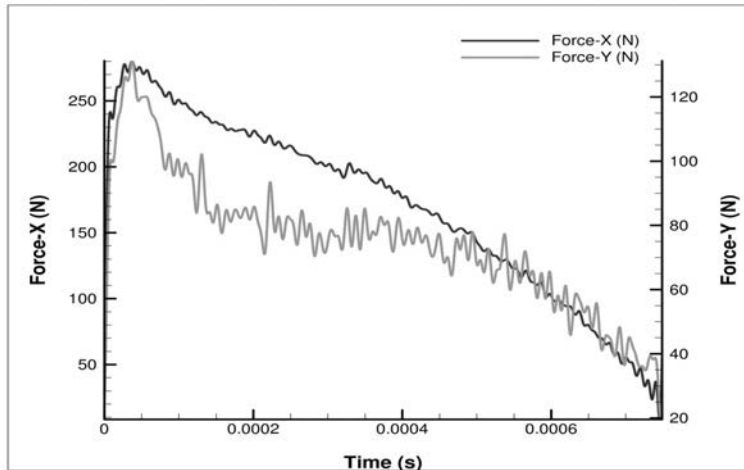


Рис. 4. Графік розподілу сил різання

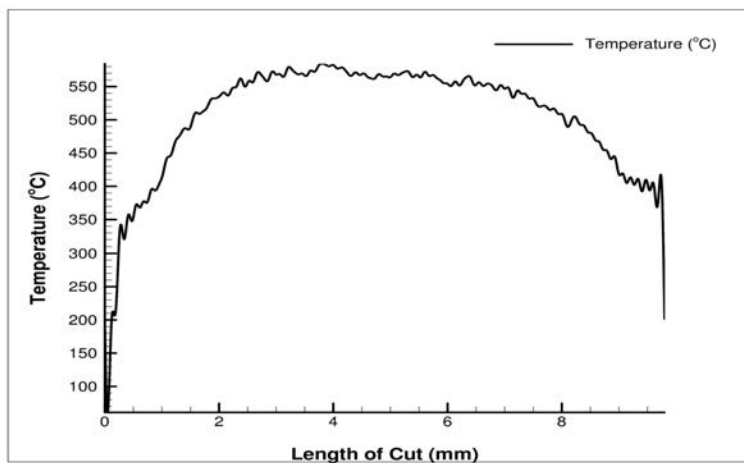


Рис. 5. Графік розподілу температури різання

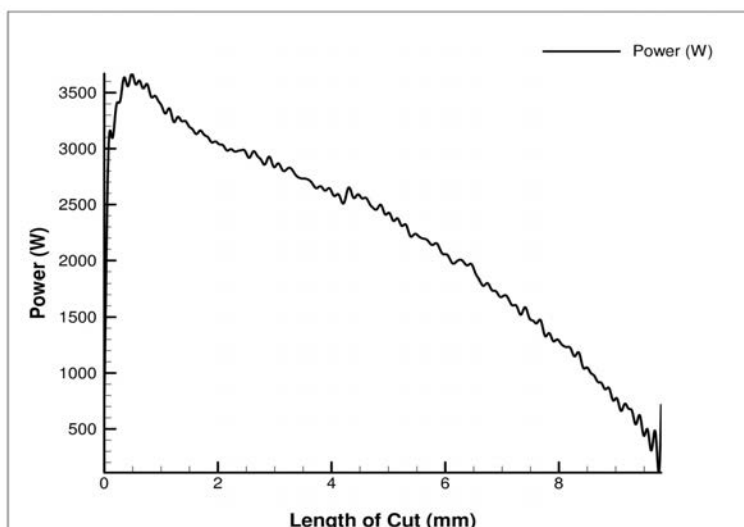


Рис. 6. Графік потужності різання

Аналіз результатів реологічного моделювання процесу зустрічного та попутного фрезерування в системі AdvantEdge наведено в таблиці.

Результати реологічного моделювання процесу зустрічного та попутного фрезерування в системі AdvantEdge

№ задачі	Матеріал	Тип фрезерування	Сили різання (max), Н		Температура в зоні різання, °С	Потужність різання, КВт
			F _x	F _y		
1	Сталь AISI 1040	Попутне	268	132	525	3,62
2		Зустрічне	238	90	594	3,11
3	Сталь AISI 8617-H	Попутне	625	305	1102	8,05
4		Зустрічне	541	193	1184	6,94
5	Чавун ASTM A-48	Попутне	330	154	622	4,31
6		Зустрічне	246	93	685	3,50
7	Сталь 316h	Попутне	322	148	854	4,22
8		Зустрічне	275	115	873	3,74

Висновки

1. Результати наведених у статті імітаційних досліджень у системі AdvantEdge достатньо адекватні, як свідчить якісний аналіз результатів напружено-деформованого стану оброблення найрепрезентативніших машинобудівних матеріалів

2. Аналіз динаміки сил різання свідчить про їх зростання у випадку попутного фрезерування порівняно із зустрічним. Тобто у разі оброблення деталі з конструкційної сталі AISI 1040 поперечна сила різання збільшується на 13 %, а поздовжня – на 47 %. Аналогічна картина спостерігається і для інших матеріалів: для гартованої сталі AISI 8617-H (HRC 46) зростання сил різання становить 16 % і 68 % відповідно; для чавуну ASTM A-48 – на 34 % і 66 %, а для нержавіючої сталі 316h поперечна сила зростає на 17 %, а поздовжня – на 29 %.

3. Аналіз термодинамічного стану заготовок під час здійснення попутного фрезерування порівняно із зустрічним дає змогу констатувати факт зменшення температури в зоні різання. У разі оброблення деталі з конструкційної сталі температура зменшується на 12 %; для гартованої сталі – лише на 7 %; для чавуну – температура зменшується на 9 %, тоді як для легированої сталі температура практично стала (зменшується лише на 2 %, що у межах похибки розрахунку).

4. Аналіз зміни потужності різання зустрічного фрезерування порівняно з попутним дав підставу констатувати факт зростання потужності в разі забезпечення аналогічних режимів різання і однотипних матеріалів. Найхарактерніше ця динаміка проявляється для обробки деталі з чавуну (ASTM A-48) – на 23 %, а також для конструкційної сталі, коли потужність зростає на 16 % для зустрічного фрезерування порівняно з попутним. У разі оброблення деталі з гартованої сталі зростання практично аналогічне – на 15 %, а для нержавіючої сталі – лише на 13 %.

5. Коливання інструменту в поперечному напрямку як для зустрічного, так і для попутного фрезерування приблизно в десять разів більше, ніж у поздовжньому, що узгоджується з результатами теоретичних та експериментальних досліджень, наведеними в роботах проф. Ю. М. Внукова [8] та проф. І. Є. Грицяя [6]. Причини та характер цих коливань пояснено в цій статті.

1. Hadia M. A. Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718 / M. A. Hadia, J. A. Ghanian, C. H. Che Harona, M. S. Kasimb // *Procedia Engineering the Malaysian International Tribology Conference MITC-2013*. – Vol. 68 (2013). P. 647–653. 2. https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/pages/down-milling.aspx. [Електронний ресурс] 3. https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/pages/down-milling.aspx.

com / en-gb / knowledge / milling / getting_started / general_guidelines / cutter_position / pages / up-milling. aspx. [Електронний ресурс] 4. Stupnytskyi Vadym. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering // Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. № 3. – 2013 (Maart). Section 1. Vol. 2. P. 50–53. 5. Stupnytskyi Vadym. Investigation of the influence of machining factors on mode of the workpiece deformation mode in the chip-forming zone by the finite element method / Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – Lviv: Lviv Polytechnic National University. – 2016. – Vol. 2. – No. 2. – P. 61–70. 6. Грицай І. Є. Силові навантаження в умовах нестационарного процесу різання черв'ячною фрезою / І. Є. Грицай // Оптимізація вироб. проц. і технічний контроль в машинобуд. Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". 2003. Вип. 480, – С. 119–123. 7. Грицай І. Є. Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс / І. Є. Грицай. – Львів: Сполом, 2009. – 254 с. 8. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков [и др.] // Сучасні технології в машинобудуванні. – Modern technologies in mechanical engineering: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – Вип. 10. – С. 3–13. 9. Грицай І. Є. Аналіз параметрів зрізів та розподілу навантаження під час роботи черв'ячної фрези з попутною та зустрічною подачею / І. Є. Грицай // Оптимізація вироб. проц. та технічний контроль в машинобуд.: Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". Вип. 359, 1999. – С. 10–19. 10. Ступницький В. В. Дослідження напружено-деформованого та термодинамічного стану заготовок в процесі зустрічного і попутного фрезерування за допомогою реологічного моделювання в системі AdvantEdge / В. В. Ступницький, Н. В. Ступницька // Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивні технології у машинобудуванні". Львів-Звенив, 5–9 лютого. – 2018. – С. 146–148.