

ІМІТАЦІЙНЕ РЕОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ

Ступницький В. В.

Приведено описание и анализ результатов реологического моделирования процесса резания в зоне стружкообразования. Результаты имитационного моделирования обеспечат расчет таких важных факторов напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности, как остаточные напряжения I и II рода, микротопология поверхностного слоя, наклёп и т. д. Проанализированы контактные процессы на передней поверхности режущего клина. Определено влияние силовых факторов на напряженно-деформированное состояние заготовки в зоне резания. Расчет этих показателей будет способствовать установлению прогностических зависимостей между структурой и параметрами технологических переходов и эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей. Это создаст предпосылки реализации принципа функционально-ориентированного технологического проектирования.

Наведено опис та аналіз результатів реологічного моделювання процесу різання в зоні стружкоутворення. Результати імітаційного моделювання забезпечать розрахунок таких важливих чинників напружено-деформованого стану обробленої поверхні, як залишкові напруження I і II роду, микротопологія поверхневого шару, наклеп тощо. Проаналізовані контактні процеси на передній поверхні різального клина. Визначений вплив силових факторів на напружено-деформований стан заготовки в зоні різання. Розрахунок цих показників сприятиме встановленню прогностичних залежностей між структурою і параметрами технологічних переходів та експлуатаційними характеристиками оброблюваних деталей. Це створить передумови реалізації принципу функціонально-орієнтованого технологічного проектування.

The article describes and analyzes the results of the rheological model of the cutting process in the area of chip formation. Simulation results provide important indicators such calculation of the stress-strain state of the machined surface, the residual stress type I and II, microtopology surface layer hardening etc. Analyzed the contact process on the front of the cutting edge. The effect of the force factors on the stress-strain state of the workpiece in the cutting zone. The calculation of these indicators will help to establish the predictive relation between the structure and the parameters of technology transition and performance of workpieces. This will create the preconditions for the realization of the principle of function-oriented process design.

Ступницький В. В.

канд. техн. наук, доц. НУ «Львовская политехника»
stupn@i.ua

НУ «ЛП» – Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов.

УДК 621.9(075.8)

Ступницький В. В.

ІМІТАЦІЙНЕ РЕОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ

Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування, теоретично обґрунтованого в роботах проф. О. М. Михайлова, базується на багаторівневому проектуванні структури технологічного процесу [1]. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. У цьому випадку, реалізується якісно новий методологічний підхід у проектуванні технологічних процесів, що полягає у формуванні технологічних дій і властивостей виробу залежно від особливостей експлуатації функціональних елементів виробу. При цьому забезпечується можливість повної адаптації виробу до умов його експлуатації, а також виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу цього виробу в машині або технологічній системі [1, 2, 3].

Таким чином, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т. ч. залишкові) мають суттєвий вплив на мікротопологію поверхні [3]. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно [4].

Метою роботи є опис та аналіз результатів реологічного моделювання процесу різання в зоні стружкоутворення, що дасть можливість визначити основні напружено-деформаційні чинники утворення таких важливих параметрів, як залишкові напруження, мікротопологія поверхні, наклеп поверхневого шару тощо. Встановлення цих показників сприятиме встановленню прогностичних залежностей між структурою і параметрами технологічних переходів та експлуатаційними характеристиками оброблюваних деталей. Це створить передумови реалізації принципу функціонально-орієнтованого технологічного проектування.

Процес утворення стружки при різанні пластичних гетерогенних ізоморфних матеріалів складається з двох етапів [5]: стиску деякого об'єму металу, що знаходиться під впливом силової дії інструментального клина, і наступного зсуву частини матеріалу заготовки у вигляді суцільного або фрагментарного сегменту. Напрямок деформацій всередині стружки відповідає напрямку ліній зсуву, по яких метал заготовки деформується на стадії стиску. Після того, як напружено-деформований стан металу досягне порогового енергетичного чи деформаційного значення, відбувається його руйнування, що призводить до формоутворення окремого стружкового елемента. У цей момент відбувається зсув елементів стружки у площині ВС (рис. 1). Причому пластична деформація поширюється в зоні, обмеженій кутом дії ψ . Відповідно кут β_1 стає кутом зсуву, а площина ВС – площиною зсуву.

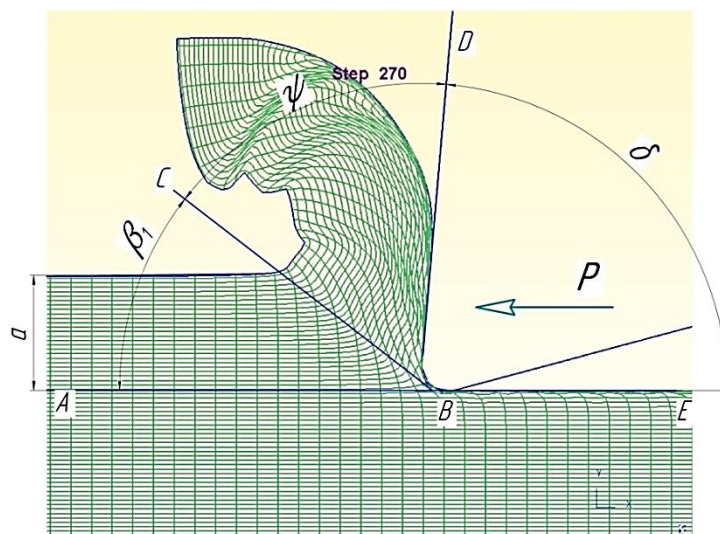


Рис. 1. Схема формоутворення стружки

Вказаний процес утворення стружки характеризує руйнування пластичних або квазіпластичних матеріалів, що обробляються з великою товщиною зрізу і при малому передньому куті різання. Зсув відбувається в одній площині, а не в об'ємі. Аналіз імітаційних моделей різання показав, що пластичні деформації відбуваються в сімействі площин віялоподібно, площини цих зрушень проходять через лезо інструменту, що підтверджує відому гіпотезу, висловлену проф. Н. Н. Зоревим [6] (рис. 2).

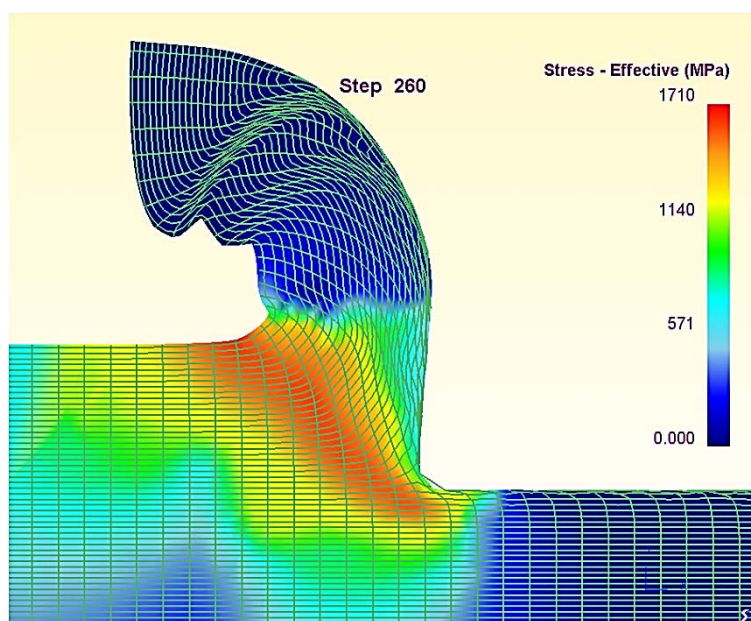


Рис. 2. Реологічна картина розподілу ефективного еквівалентного напруження в зоні стружкоутворення

Поверхня зі слідом BC (рис. 1) – межа між матеріалом заготовки у початковому стані і обробленим матеріалом з суттєво вираженою деформацією. Матеріал заготовки, що знаходиться під обробленою поверхнею, виходить пластично деформованим, тобто має місце наклеп поверхні, хоча міра деформації тут значно менша. Межа між деформованим металом утвореної стружки і основним матеріалом заготовки проходить вздовж кривої лінії, яка для спрощення також може бути прийнята у вигляді ламаної лінії (рис. 3). Зливна стружка

є суцільною стрічкою, окремі елементи якої важко помітити. Проте цей процес якісно відображається у реологічній моделі з елементами моделювання деформованого стану лагранжевою сіткою [7, 8]. Шари матеріалу, що ковзають по різцю, як би вигинаються в напрямі, протилежному переміщенню стружки. Причина викривлення полягає в створенні значного тертя між стружкою і передньою поверхнею інструменту [5].

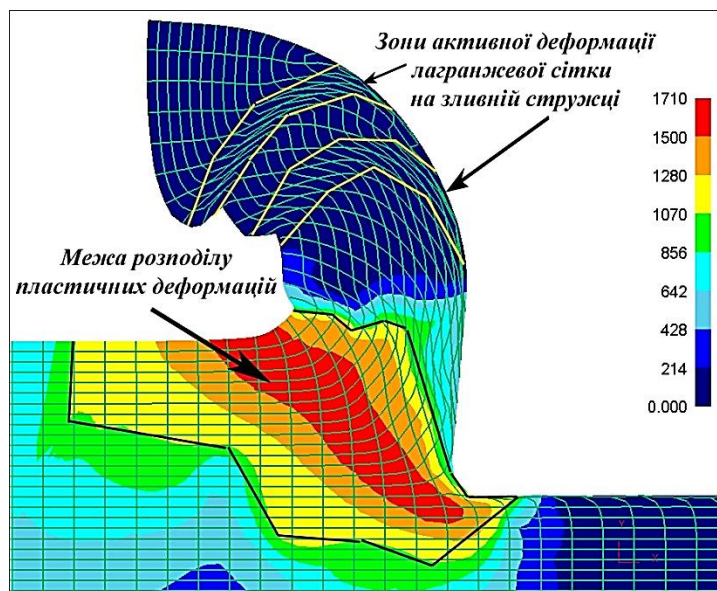


Рис. 3. Межі деформаційних та пластичних зон в області формоутворення зливної стружки

Таким чином, в стружці відзначаються два напрями пластичної деформації. Перший – в напрямку площини зсуву (рис. 4), другий – вздовж передньої поверхні різця (зона «вторинної» деформації). Ширина зони «вторинної» деформації невелика і, як правило, не перевищує 10 % від товщини стружки. Відстань між зернами в цьому шарі в 30...40 разів менше, ніж відстань між зернами в недеформованому металі [5].

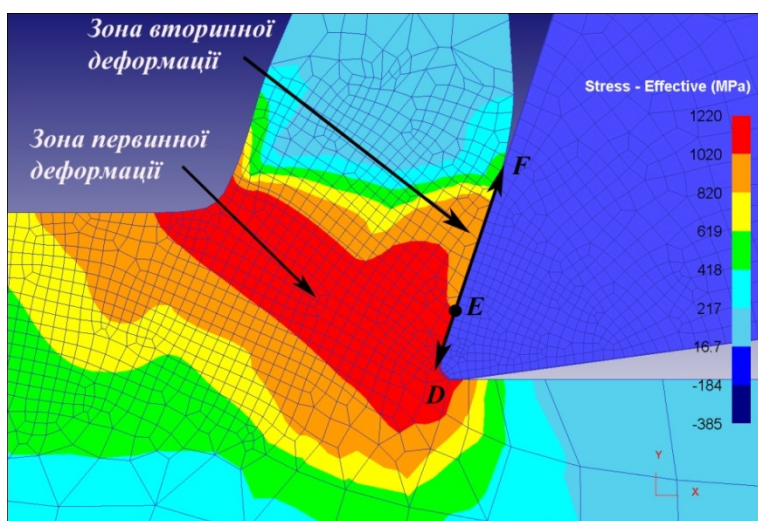


Рис. 4. Зони деформації в області стружкоутворення

В результаті додаткової деформації матеріал стружки отримує значне зміцнення. Твердість його зростає в 1,5...2 рази по відношенню до твердості початкового матеріалу: чим ближче до передньої поверхні, тим вище твердість. На деякій довжині відрізка $|DF|$

стружка контактує з інструментом, а потім відхиляється від нього і завивається. При збільшенні швидкості різання радіус завивання стружки збільшується, що доведено великою кількістю імітаційних моделей та рядом експериментальних даних [9, 10].

Аналізуючи контактні процеси на передній поверхні різального клина, можна зробити такі висновки (рис. 4):

а) на передній поверхні інструмента на довжині $DF = l$, можна прослідкувати формування 2-х зон (рис. 4): зони пластичного контакту довжиною $DE = l_1$ і зони пружного контакту $EF = l_2$. На ділянці l_1 (пластичного контакту) розташовується загальмований шар матеріалу, в межах якого стружка рухається не по передній поверхні, а по цьому загальмованому шару, і опір руху стружки визначається величиною опору зсуву в контактному шарі стружки. На цій ділянці зовнішнє тертя ковзання відсутнє і замінюється «внутрішнім» тертям між окремими шарами стружки. На ділянці l_2 стружка контактує безпосередньо з передньою поверхнею інструмента. Тут відбувається зовнішнє тертя ковзання і величина опору руху стружки визначається силою тертя між стружкою та передньою поверхнею. Довжина ділянки пластичного контакту l_1 залежить від переднього кута інструмента, товщини зрізаного шару і коефіцієнта усадки стружки. Причому, аналіз великої кількості імітаційних реологічних моделей доводить, що $l_2 \approx 0,5l_1$. Ця залежність підтверджується численними теоретичними та експериментальними дослідженнями [10–12].

б) в зоні пластичного контакту дотичні напруження практично однакові і дорівнюють $\tau_p \approx 1200$ МПа (для різання сталі 45 – рис. 4), а в зоні пружного контакту асимптотично зменшуються з 1020 МПа до 420 МПа за законом:

$$\tau = \tau_p \left(\frac{l_1}{x} \right)^3, \quad (1)$$

де $x \geq l_1$ – змінна координата на передній поверхні, що відраховується від точки D .
Тоді середнє дотичне напруження на ділянці EF :

$$\bar{\tau}_{EF} = \frac{\tau_p}{l_0} \int_{l_1}^{2l_1} \left(\frac{l_1}{x} \right)^3 dx = 0,375\tau_p, \quad (2)$$

а по всій довжині контакту DF :

$$\bar{\tau}_{DF} = \frac{\tau_p l_0 + 0,375\tau_p l_0}{l} = 0,6875\tau_p. \quad (3)$$

Це підтверджується теоретичними та експериментальними дослідженнями [5, 9, 10]. Сумарна сила пластичного та пружного тертя стружки об передню поверхню інструмента визначається за формулою:

$$F_n = 0,6875\tau_p b_1 l. \quad (4)$$

Враховуючи залежність, визначену проф. П. І. Ящеріциним [5]:

$$F_n = \tau_p \cdot t \cdot \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{\xi} - \cos \gamma + \sin \gamma \right), \quad (5)$$

де t – глибина різання;

γ – передній кут різального клина;

ξ – коефіцієнт усадки стружки.

Отримуємо формулу для довжини контакту l у вигляді:

$$\frac{l}{t} = 1,45 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{\xi} - \cos \gamma + \sin \gamma \right). \quad (6)$$

Таким чином, відношення довжини контакту стружки з інструментом до товщини зрізу є функцією переднього кута γ і тангенса кута нахилу площини зсуву BC , тобто усадки стружки. За умови збільшення глибини різання t зростає усадка стружки ξ і це спричинює вплив глибини різання на довжину контакту l в ступені, менше одиниці. При постійному значенні усадки стружки ξ довжина контакту l зростає прямо пропорційною глибині різання t . Величина ξ зменшується із зростанням коефіцієнтів теплопровідності інструментального і оброблюваного матеріалів, але довжина контакту стружки з інструментом завжди буде більше при різанні сталей і сплавів з високим коефіцієнтом теплопровідності та різцями з пластинками різального матеріалу підвищеної теплопровідності [10].

Для матеріалів, що характеризуються високою мірою анізотропії пружних і міцнісних властивостей, вплив застосування різних критеріїв руйнування матеріалів на результати розрахунків в першу чергу залежить від інтенсивності деформації ϵ . Як показали чисельні розрахунки та аналіз результатів імітаційного моделювання в системах Deform 2D (3D), ABAQUS, Advantedge, LS Dyna [4, 7, 13], саме вибір критерію руйнування істотно впливає на процес руйнування. Врахування різних характеристик матеріалу в зоні стружкоутворення при розтягуванні і стисканні дозволяє адекватніше моделювати процес різання, але збільшення кількості незалежних міцнісних характеристик пред'являє більш високі вимоги до адекватності поправочних коефіцієнтів, визначених на основі експериментальних даних.

На рис. 5 наведена реологічна картина зон стиску та розтягу при різанні заготовки з конструкційної сталі 45 ($S = 0,25$ мм; $t = 1$ мм; $V = 120$ м/хв).

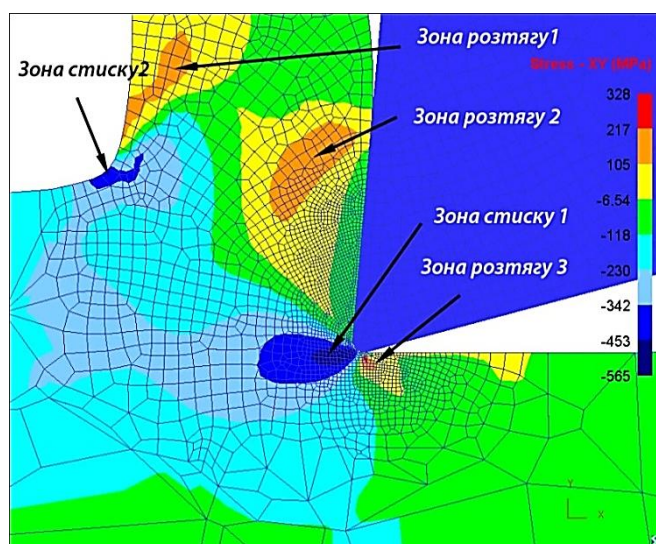


Рис. 5. Реологічна картина розподілу зон напруження під час оброблення заготовки зі сталі 45 ($S = 0,25$ мм; $t = 1$ мм; $V = 120$ м/хв)

Очевидно, що в області контакту заготовки з передньою поверхнею леза інструменту і в місці її затискання біля вершини леза спостерігається явище стискання матеріалу заготовки (зона стиску 1), аналогічна картина стиску знаходиться з протилежного боку стружкоутворення (зона стиску 2). Причому напруження в зоні стиску 1 ($\tau_{xy} \approx 560$ МПа) набагато інтенсивніші від напружень в зоні стиску 2 ($\tau_{xy} \approx 400$ МПа). В результаті енергетичного

балансу, формуються також області розтягу в зоні зовнішнього стружкоутворення (зона розтягу 1), в зоні, що межує з областю вторинних деформацій – близько передньої поверхні різального клина (зона розтягу 2) та в зоні, що наближена до задньої поверхні інструменту (зона розтягу 3). Причому, якщо площа та інтенсивність деформацій в зонах розтягу 1 і 2 приблизно однакові ($\tau_{xy} \approx 180 \dots 200$ МПа), то інтенсивність напружень в зоні 3 є вищою ($\tau_{xy} \approx 300$ МПа), але більш локальною. В даному випадку значення та розподіл зон напруженості суттєво впливає на характер та геометрію стружкового елемента. Крім того, інтенсивність та локалізація зон стиску 1 і розтягу 3 формує залишкові напруження та деформації на обробленій поверхні заготовки.

З метою аналізу напружено-деформованого стану заготовки в зоні стружкоутворення була побудована та реалізована в системі Deform 2D реологічна імітаційна модель, що дозволила більш детально розглянути також динамічні процеси формоутворення стружки та поширення впливу силових та енергетичних чинників процесу різання, дослідити вплив технологічних показників (глибини різання, подачі, швидкості різання, геометричних параметрів різального клина тощо) на формування стружки та стан обробленої поверхні.

В імітаційній реологічній моделі зона розподілу інтенсивності деформацій розділена адаптивною градієнтною сіткою з меншою густиною в області інтенсивних деформаційних процесів. Найменше значення густини сітки (зона контакту передньої поверхні різального клина до заготовки) становить 0,01 мм, густина концентрації сітки – 25 %. Потім ця ж сітка переноситься на графічно представлені результати розрахунку. Внаслідок цього можна для будь-якої області, обкресленою вибраним осередком, встановити значення ефективного та еквівалентного напруження ($\bar{\sigma}, \sigma_{\max}$), деформацій (ε), швидкості поширення деформацій ($\dot{\varepsilon}$), температури T тощо.

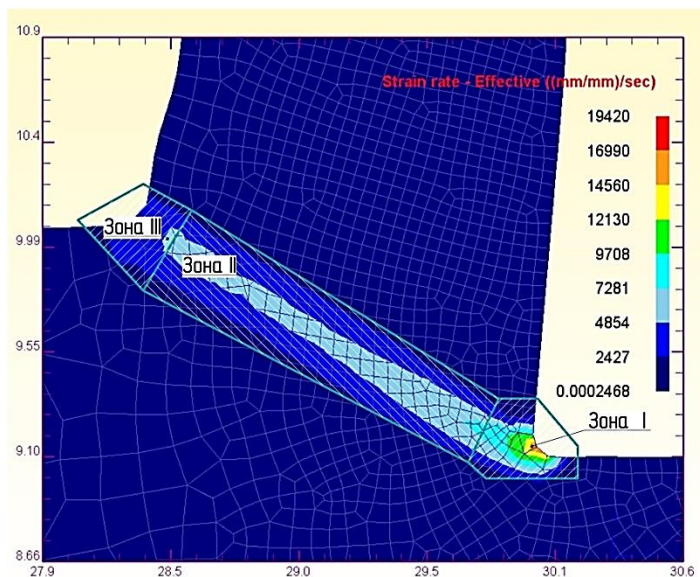


Рис. 6. Зони розподілу в інтенсивності деформацій в області зсуву стружки

В області стружкоутворення можна чітко окреслити 3 зони поширення деформаційних явищ. Зона I знаходиться на вершині різального клину і характеризується значними стискуючими деформаціями. Протилежна їй зона III має також пікові показники напруження, які викликані інтенсивною зміною геометрії поверхневого шару заготовки внаслідок накладення зсувних та згинальних деформацій. Зона II є проміжною ланкою, що інтерферентно та локально поширює деформації вздовж площини зсуву. Зони I і III характеризуються невіднозначеністю напруженого стану. Вони збільшуються по мірі зростання навантаження.

Напруження в зоні II, в основному, рівномірне. По мірі наближення пластичної області в район умовної площини зсуву до стану пластичного «шарніра» зони I і III зближуються за рахунок зменшення зони II.

Критерії міцності по умовній площині зсуву повністю відповідають доведеній гіпотезі про взаємодію при різанні робіт стискання і згину [6, 11]. Біля різальної кромки запас пластичності для цієї розрахункової схеми вичерпаний в найбільшій мірі. Очевидним є зростання критерію руйнування при наближенні до місця «затискання» стружки-консоли в зоні стиску III.

Виконані розрахунки вказують на безпосередній вплив вигину (разом із стисканням) на формування напружено-деформованого стану заготовки. Це дозволяє визнавати аналітично доведеною взаємодію робіт стискання і вигину при різанні, на якому базується механізм стружкоутворення [12].

ВИСНОВКИ

В результаті імітаційного моделювання реологічного стану заготовки при різанні встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану зони різання і питомої роботи стружкоутворення, інваріантні в широких інтервалах зміни умов та режимів оброблення, що може стати імітаційно-реологічною основою механіки процесу різання металів з ізоморфними механічними властивостями. Отримані аналітичні залежності та практичні рекомендації можуть слугувати теоретичним апаратом для кількісного аналізу внутрішніх взаємозв'язків і чинників, що визначають ефективність відповідного методу оброблення як засіб підвищення оброблюваності матеріалів різанням, а також можуть знайти застосування при створенні інших методів обробки, що використовують додаткові види механічної дії на матеріал. Результати імітаційного реологічного моделювання забезпечать розрахунок таких важливих чинників напружено-деформованого стану обробленої поверхні, як залишкові напруження I і II роду, мікротопологія поверхневого шару, наклеп тощо. Ці показники є вкрай важливими складовими загальної моделі технологічного проектування структури та параметрів технологічного процесу, складеного на основі функціонально-орієнтованого підходу, що базується на концепції паралельного інжинірінга PLM-системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Stupnytskyy V. Use of the CAF-system (Computer Aided Forming) in Integer Computer Aided Manufacturing / V. Stupnytskyy // Papers of the XX Ukrainian-Polish Conference on CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues. – CADMD, 2012. – Lviv. – P.45–48.
3. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залоза, В. Г. Корбач. – Суми : Вид-во СумДУ, 2009. – 208 с.
5. Яцерицын П. И. Теория резания / П. И. Яцерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
6. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания / Н. Н. Зорев. – М. : Машигиз, 1956. – 367 с.
7. J. Paulo Davim. Machining of Hard Materials / Paulo Davim. – London : Springer, 2011. – 225 p.
8. Конева Н. А. Природа стадий пластической деформации / Н. А. Конева // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 99–105.
9. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / Н. А. Конева. – М. : Машиностроение, 1977. – 304 с.
10. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
11. Армарево И. Дж. А. Обработка металлов резанием / И. Дж. А. Армарево, Р. Х. Браун. – М. : Машиностроение, 1977. – 325 с.
12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
13. Швець С. В. Применение феноменологической теории деформируемости при исследовании процесса стружкоутворення / С. В. Швець // Вісник СумДУ. – 2003. – № 3 (49). – С. 144–161.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2012 р.