

## МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПЛОЩИН КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ КОМБІНОВАНИМИ ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ, ОСНАЩЕНИМИ НТМ

© Шахбазов Я.О., Білявський М.Л., Стецько Ю.Б., 2009

**Запропонований алгоритм та представлено результати математичного моделювання процесу обробки попередньо зміцненого шару незагартованої сталі комбінованим інструментом, оснащеним надтвердим матеріалом.**

**Algorithm of mathematic models and results of machining non-hardened steels after surface plastic deforming by combined by special tool are defined.**

**Постановка проблеми.** Сучасні умови роботи промислового комплексу визначають необхідність прийняття рішень, пов'язаних з використанням оптимальних технологій виробництва машин і устаткування. Серед найважливіших завдань сучасного машинобудування особливе місце посідає підвищення ефективності обробки деталей машин. Це завдання включає в себе досягнення високої продуктивності і забезпечення якості обробленої поверхні. Розширення обсягів використання у машинобудуванні важкооброблюваних матеріалів та проблема їхньої обробки вимагають удосконалення існуючих технологічних процесів.

Сьогодні однією з основних тенденцій розвитку технології машинобудування є обробка сталей інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ) [1].

За умов гострого дефіциту легованих сталей та спеціальних сплавів важливу роль у машинобудуванні набувають поширені конструкційні матеріали, такі як сталі та чавуни.

Високопродуктивна обробка незагартованих сталей інструментами, оснащеними НТМ, проблематична, що пояснюється високою інтенсивністю зношування інструментів.

Відомо, що збільшення твердості незагартованої сталі призводить до зменшення довжини контактної площадки на передній поверхні і збільшення стійкості різального інструмента, оснащеного НТМ [1, 2].

Тому за рахунок збільшення мікротвердості металу можна підвищити ефективність обробки інструментом, оснащеним НТМ.

Сьогодні існують прогресивні технологічні процеси обробки, які забезпечують зміцнення поверхневого шару деталей. Одне з провідних місць належить поверхневому пластичному деформуванню (ППД). ППД дає змогу отримати необхідний мікрорельєф поверхні, структуру поверхневого шару, зміцнити його і забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики [2–5].

Експериментально встановлено, що глибина зміцненого шару незагартованої сталі обкочуванням сягає близько 185 мкм з середньою мікротвердістю, яка у 1,5–2 рази більша за мікротвердість матриці металу.

Глибина зміцненого шару, що утворена технологічними методами ППД, дає змогу реалізувати подальшу ефективну обробку інструментом, оснащеним НТМ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчення експериментальних досліджень не дає можливості зрозуміти перебіг процесу різання, а відомі розрахункові розв'язки відрізняються від експериментальних даних. Разом з тим не були вивчені питання, пов'язані з побудовою алгоритму моделювання процесу різання зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ.

Питання підвищення ефективності обробки сталей різанням з попереднім поверхневим пластичним деформуванням розглядаються у [5, 8, 9], де процес різання з попереднім поверхневим пластичним деформуванням розглядається під час оброблення циліндричних деталей, при цьому різальний інструмент оснащений твердим сплавом.

Відомі схеми обробки при точінні, струганні та протягуванні, в яких відбувається попереднє пластичне деформування, проте відсутні рекомендації щодо використання цього процесу за торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей машин із незагартованих сталей інструментом, оснащеним НТМ.

Передбачається, що окремо розглянуті процеси ППД і різання повністю обґрунтовують запропонований комбінований метод. Тому створення математичної моделі процесів різання на основі теорії пружньо-пластичного деформування та руйнування є актуальним завданням.

**Формулювання мети дослідження** полягає у розробленні алгоритму моделювання термосилових процесів під час реалізації технологічного процесу обробки комбінованими торцевими фрезами, оснащеними НТМ, з попереднім пластичним деформуванням незагартованих сталей.

**Викладення основного матеріалу.** У [2] був запропонований технологічний процес обробки незагартованих сталей різанням комбінованим інструментом, оснащеним НТМ, з попереднім пластичним деформуванням.

Як вихідну математичну модель розрахунку глибини зміцненого шару приймемо рівняння з теорії пружності для визначення осьових  $S_v$  та тангенційних  $S_z$  напружень в тілі деталі від зусилля  $P$ , що прикладене до неї [10]:

$$\sigma_z = \frac{P}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \cdot \left[ \frac{1}{z^2} - \frac{h_y}{z^2} \cdot (z^2 + h_y^2)^{-1/2} \right] - 3z^2 h_y \cdot (z^2 + h_y^2)^{-5/2} \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{3P}{2\pi} \cdot h_y^3 \cdot (z^2 + h_y^2)^{-5/2},$$

де  $P$  – сила поверхневого пластичного деформування, Н;  $h_y$  – глибина розташування точки у поверхневому шарі, мм;  $\nu$  – швидкість руху деформівного елемента, м/хв;  $z$  – ширина контакту деформівного елемента з оброблюваною заготовкою, мм.

Аналіз приведеної математичної залежності підтверджує багато експериментальних результатів інших авторів [5, 7, 10].

Прийнявши у формулі (1) значення елементарної сили у вигляді  $P = S_k \cdot dz \cdot dl_k$ , отримаємо інтегральне рівняння для визначення глибини зміцнення  $h_{zm}$  залежно від розподілення напружень по площі контакту;

для осьових напружень

$$\sigma_T - \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} 0.48 \cdot \frac{h_{zm}^3 \sigma_k}{(z^2 + (l_p - l_{zm})^2 + h_{zm}^2)^{5/2}} dl_k dz = 0, \quad (2)$$

для тангенційних напружень

$$\sigma_T - \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} \frac{\sigma_k}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[ \frac{1}{(l_k - l_m)^2} (1 - h_{zm} R) \right] - 3 \cdot (l_k - l_m)^2 \cdot h_{zm} \cdot R^{-3/2} \right\} dz dl_k = 0, \quad (3)$$

де  $S_k$  – розподілене напруження в контактї;  $h_{zm}$  – координата глибини зміцнення;  $l_m$  – координата точки контакту, в якій прикладене максимальне напруження  $S_m$ ;  $R$  – відстань від прикладеного напруження в контактї до точки у тілі деталі.

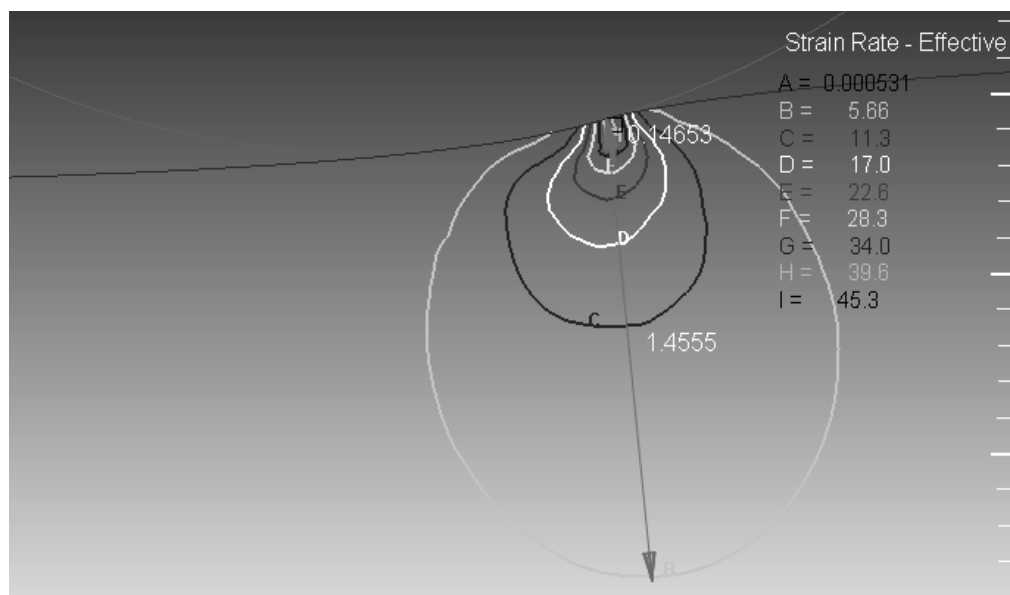
З огляду на [10], можна стверджувати, що на глибину зміцнення істотний вплив здійснює величина максимальних напружень у контактї.

В основу визначення залишкових напружень закладено положення про те, що напруження  $S_{nl}$ , які присутні в тілі деталі під час пластичної деформації перед розвантаженням, складаються з пружними напруженнями, які могли б виникнути під дією зовнішнього навантаження протилежного знака  $S_{np}$ :

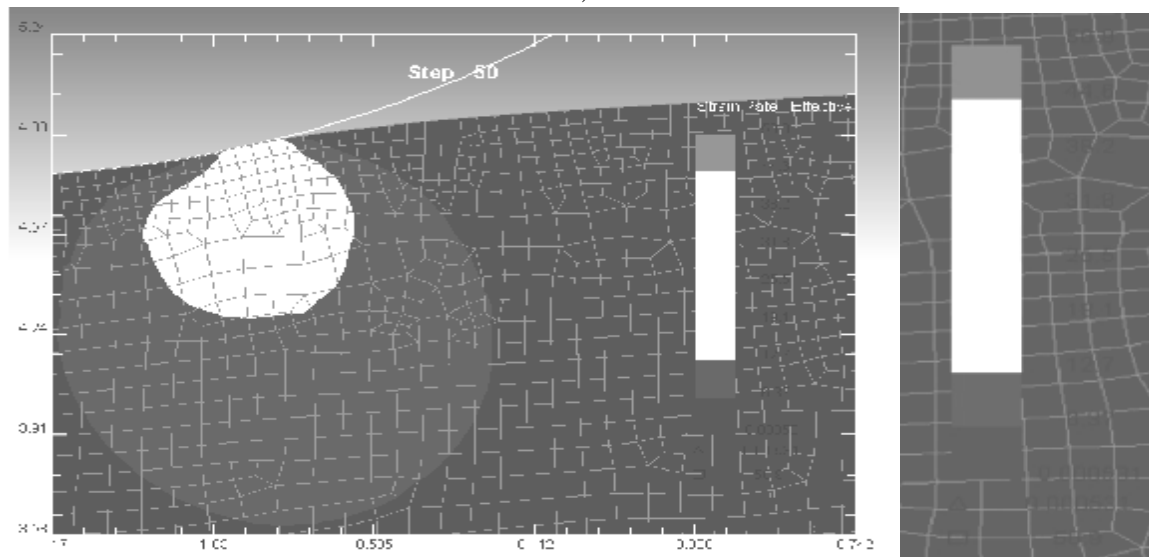
$$\sigma_o = \sigma_{nl} + \sigma_{np}. \quad (4)$$

Враховуючи це, розрахунок залишкових напружень може бути проведений за залежностями (2) та (3) з врахуванням залежності (4).

Для розв'язання задачі дослідження глибини зміцненого шару та аналізу стану поверхневого шару незагартованої сталі після ППД за залежностям (1–4) була застосована система автоматизованого проектування Deform 2D.



a)



б)

Рис. 1. Моделювання глибини зміцнення та аналіз напруженого шару після обкочування незагартованої сталі 40 (HB200), за сили обкочування 250 Н: а – розрахунок глибини зміцненого шару (0,146 мм); б – розподілення напружень

Розглянемо схеми видалення частини зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ (рис. 2).

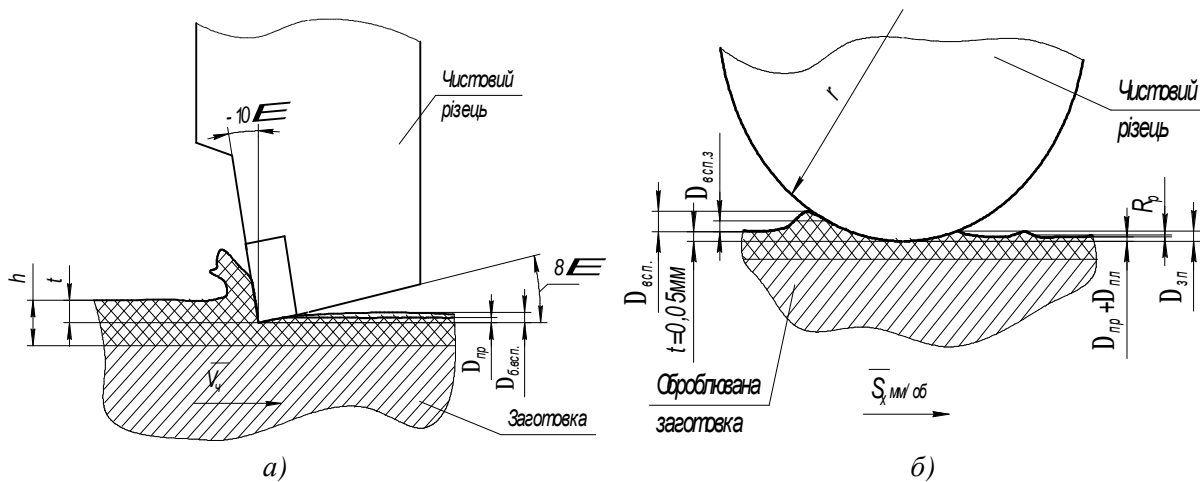


Рис. 2. Схема видалення частини зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ: а – вигляд збоку; б – вигляд спереду;  $D_{б.всп.}$  – деформація вспучування бокова;  $D_{пр.}$  – пружна деформація;  $t$  – глибина різання;  $\vec{V}_q$  – вектор швидкості;  $h$  – глибина зміцненого шару.  $D_{пр.}$  – пружна деформація;

$D_{зн.} = D_{пр.} + R_p + D_{пл.}$  – деформація загальна і  $R_p$ ;  $D_{пл.}$  – пластична деформація;

$D_{всп.}$  – деформація вспучування;  $D_{всп.з}$  – деформація вспучування залишкова

Для розгляду процесів деформування середовищ використовують дві системи координат: Лагранжеву та Ейлерову.

Спираючись на рис. 1, для моделювання напружень у твердому тілі, що викликані деформацією матеріальних волокон, має бути реалізоване розділення руху середовища на трансляційне та деформаційне на основі представлення градієнта швидкості  $\hat{\nabla}\vec{V}$  у вигляді симетричної  $W$  та асиметричної частин  $\Omega$  [10].

У цьому випадку деформаційний рух визначається тензором деформації швидкості:

$$W = \frac{1}{2}(\vec{V}\hat{\nabla} + \hat{\nabla}\vec{V}). \quad (5)$$

Асиметричний тензор  $\Omega$  характеризує миттєву кутову швидкість обертання матеріальних волокон, направлених навколо головних осей тензора деформації швидкості  $W$ :

$$\Omega = \frac{1}{2}(\vec{V}\hat{\nabla} - \hat{\nabla}\vec{V}). \quad (6)$$

Під час формування закономірностей (1–4) теорії пружно-пластичних процесів для визначення перебігу процесів вибрано міру деформації  $H$ , швидкість зміни якої стосовно базису  $\Omega$  збігається з тензором деформації швидкості:  $H^{\nabla} = W$  [10].

Як міра, що характеризує напружений стан деформування середовища, вибрано симетричний тензор напружень Коші  $S$  [10]. В основу процесу деформування покладено узагальнену теорію [8, 10]. Використано швидкісну постановку опису поведінки середовища [10].

Для дослідження кінематики термосилових процесів деформування покладено модифікацію принципу [8, 10], відповідно до якого для рівноваги перебігу процесу необхідно та достатньо, щоб сумарна робота швидкостей та сил, що діють на елементарний об'єм деформівного тіла, за будь-яких можливих швидкостей дорівнювала нулю [10].

У цьому випадку для будь-якого моменту часу для тіла з об'ємом  $V$  повинна виконуватись така умова:

$$\int \left[ \frac{d}{dt} (\nabla \cdot S + \bar{F}) \cdot \delta \bar{V} \right] dV = 0, \quad (7)$$

де  $\bar{F}$  – вектор масових сил.

Варіаційне співвідношення, що визначає розвиток нестационарного квазістатичного процесу, визначається залежністю [10]:

$$\begin{aligned} & \int_V [\tilde{S}^{\nabla} + \dot{\Theta} S + S \cdot \Omega - W \cdot S] \delta(\bar{V} \hat{\nabla}) dV - \\ & - \int_{\Sigma_S} [\bar{P} + \bar{P}(\dot{\Theta} - \bar{n} \cdot W \cdot \bar{n})] \delta \bar{V} d\Sigma = \int_V (\bar{F} + \dot{\Theta} \bar{F}) \cdot \delta \bar{V} dV, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Sigma_S$  – поверхня тіла з заданими зовнішніми силами;  $\Sigma_V$  – поверхня, на якій задані кінематичні умови, що визначають відношення:

$$\int \left[ \frac{d}{dt} (\nabla \cdot S + \bar{F}) \cdot \delta \bar{V} \right] dV = 0; \quad (9)$$

$$\sigma = K \dot{\Theta}, \quad \tilde{S}^{\nabla} = N \tilde{W} + (P - N) \frac{\tilde{S} \cdot \tilde{W}}{\tilde{S}^2} \tilde{S}; \quad (10)$$

кінематичні відношення:

$$W = \frac{1}{2} (\bar{V} \hat{\nabla} + \hat{\nabla} \bar{V}), \quad \tilde{W} = W - \frac{1}{3} \dot{\Theta} E; \quad (11)$$

$$\Omega = \frac{1}{2} (\bar{V} \hat{\nabla} - \hat{\nabla} \bar{V}), \quad \dot{\Theta} = \hat{\nabla} \bar{V}; \quad (12)$$

кінематичні граничні умови

$$\bar{V} = \bar{V}|_{\Gamma}(t), \quad \bar{r} \in \Sigma_V^t. \quad (13)$$

За початкових умов

$$\bar{U} = \bar{U}_0, \quad \hat{\nabla} \cdot S_0 + \bar{F}^0 = 0 \quad r \in V^0; \quad (14)$$

$$\bar{n} \cdot S^0 = \bar{P}^0 \quad r \in \Sigma_S^0. \quad (15)$$

Інтегральні співвідношення відповідають вектору переміщень та тензору напружень:

$$\bar{U} = \bar{U}^0 + \int_0^t \bar{V}(\tau) d\tau; \quad (16)$$

$$S = S^0 + \int_0^t \dot{S}(\tau) d\tau = S^0 + \int_0^t [\dot{\sigma} E + \tilde{S}^{\nabla} - S \cdot \Omega + \Omega \cdot S] d\tau. \quad (17)$$

Розв'язок поставленої задачі зводиться до пошуку вектор-функції  $\bar{V}(t)$ .

Наступна задача, яка має бути розв'язана під час моделювання процесу обробки зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ, є аналіз моменту руйнування обробленого матеріалу.

Для оцінки моменту руйнування цілісності матеріалу використовують два критерії руйнування:

1) за інтенсивністю напружень:  $\tilde{S} \geq \tilde{S}_V$ , де  $\tilde{S}_V$  – експериментальне значення інтенсивності напружень за розриву. Іntenсивність напружень визначають так:

$$\tilde{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{S_{11}^2 + S_{22}^2 + (S_{11} - S_{22})^2 + 6 \cdot S_{12}^2}; \quad (18)$$

2) за головною деформацією в зоні розділення:  $d_1 > d_2$ ,  $d_1 > d_{pp}$ , де  $d_1, d_2$  – головні деформації в зоні розділення;  $d_{pp}$  – відносне подовження у момент розриву на взірці.

Деформація в зоні розділення визначається, як

$$d_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{e_{11} \cdot e_{22} + e_{11}^2 + e_{22}^2 + \frac{3}{4} \cdot e_{12}^2}. \quad (19)$$

Для вирішення поставленої мети, моделювання параметрів процесу обробки частини зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ, на основі залежностей (5) – (19) необхідно визначити алгоритм введення першочергових даних, що визначатимуть перебіг процесу у часі, який показано на рис. 3.

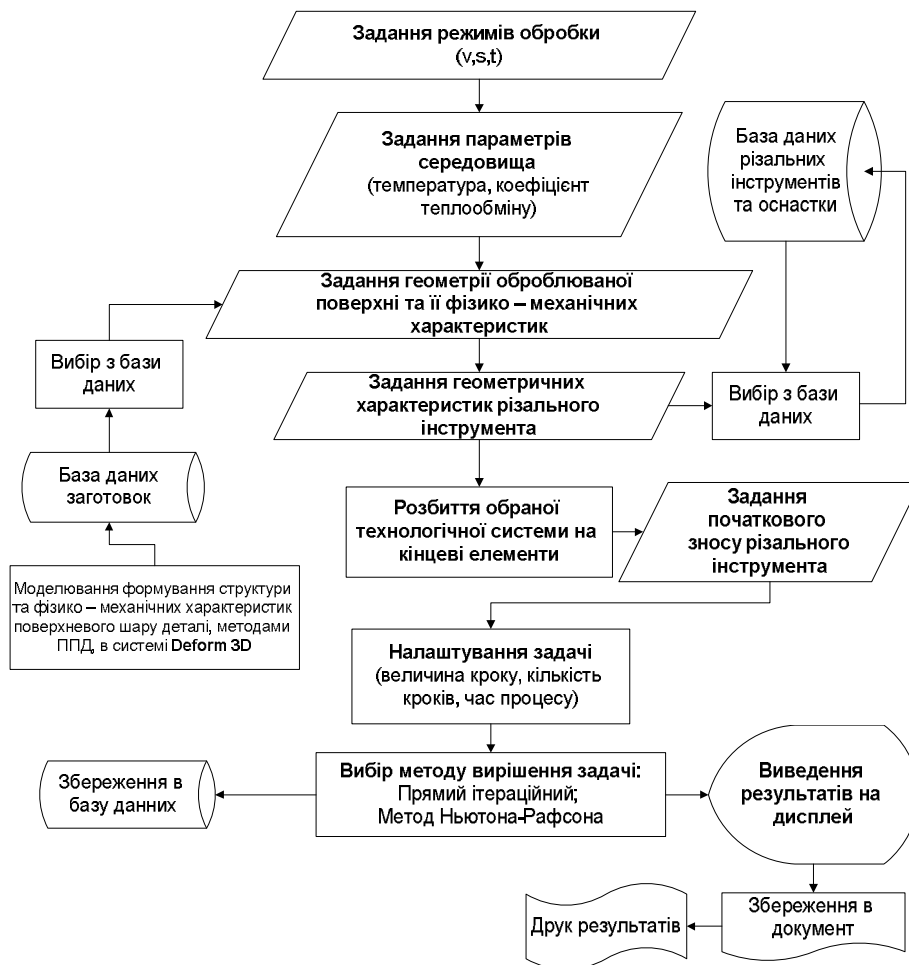


Рис. 3. Схема роботи алгоритму з моделювання обробки поверхонь з незагартованих сталей комбінуванням різання та ППД

Отже, у початковий момент часу відбувається деформування матеріалу без руйнування до моменту виникнення у зоні контакту напружень. За перебільшення критичного значення відбувається відокремлення матеріалу та подальший рух різального інструменту.

Отже, процес обробки попередньо зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ, розбивається на три стадії:

- 1) початковий момент різання без руйнування матеріалу (чиста деформація);
- 2) невстановлений режим різання, що характеризується зміною сили різання;
- 3) встановлений режим різання, за якого сила різання не змінюється або змінюється у певному діапазоні.

Наведений алгоритм (рис. 3) дає можливість отримання певних результатів (рис. 4).



Рис. 4. Результати, які можливо отримати, використовуючи розроблений алгоритм у системі Deform 3D

Отримання результатів моделювання за запропонованим алгоритмом, сукупності даних: зміни сили різання, розподілення температурних полів та напружень, що дає змогу провести комплексний аналіз відмінностей процесу різання зміцненого шару від класичного різання інструментом, оснащеним НТМ.

Врахування сукупного впливу на стан різального інструменту під час обробки зміцненого шару відбувається за алгоритмом, показаним нижче (рис. 5).

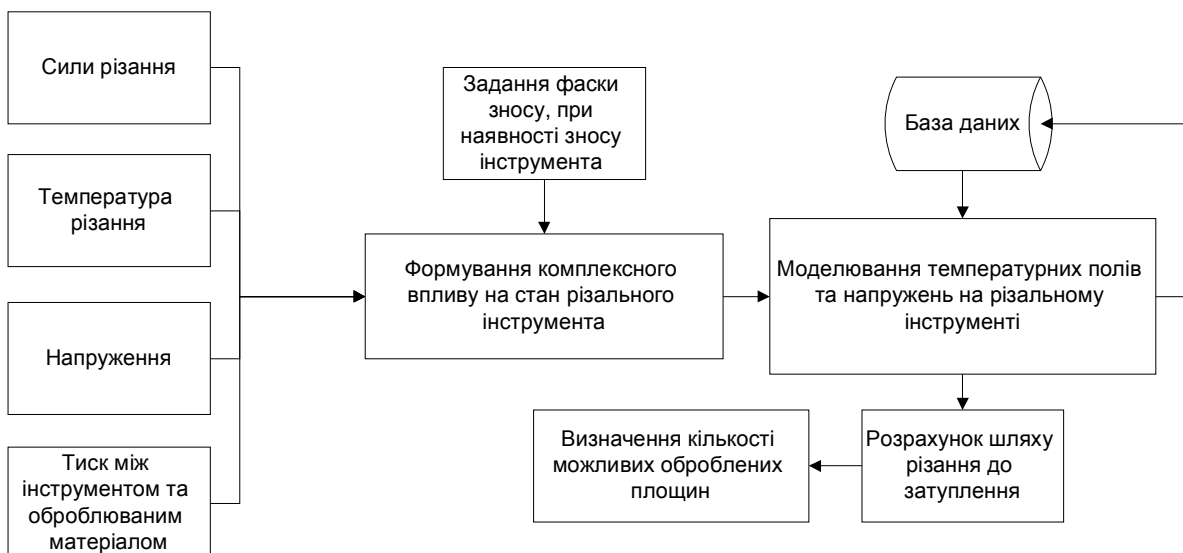
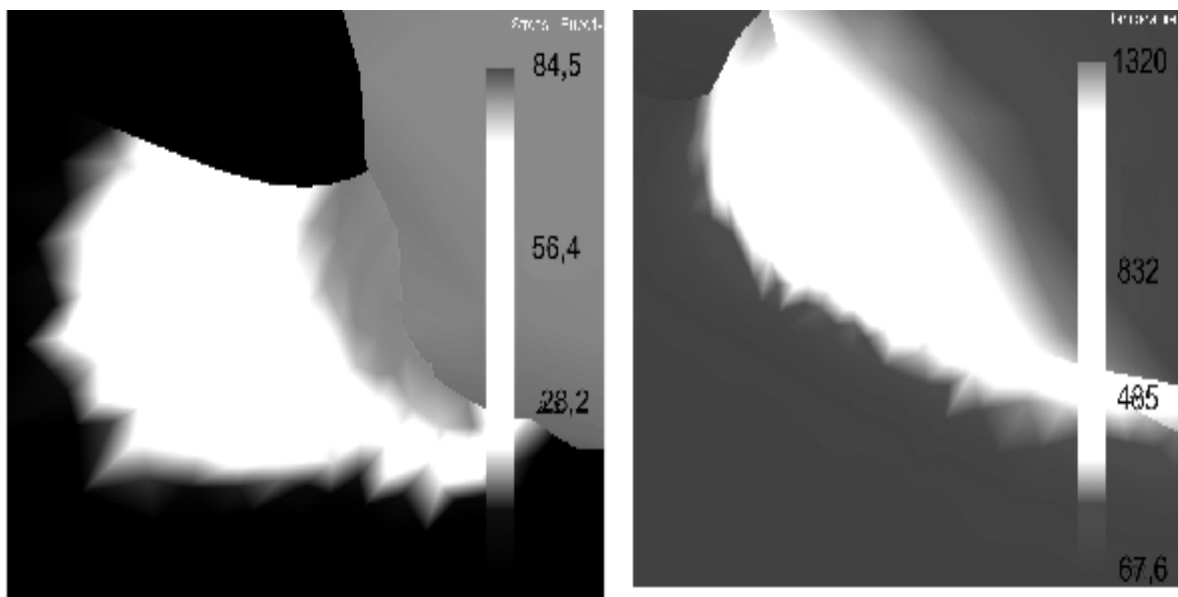


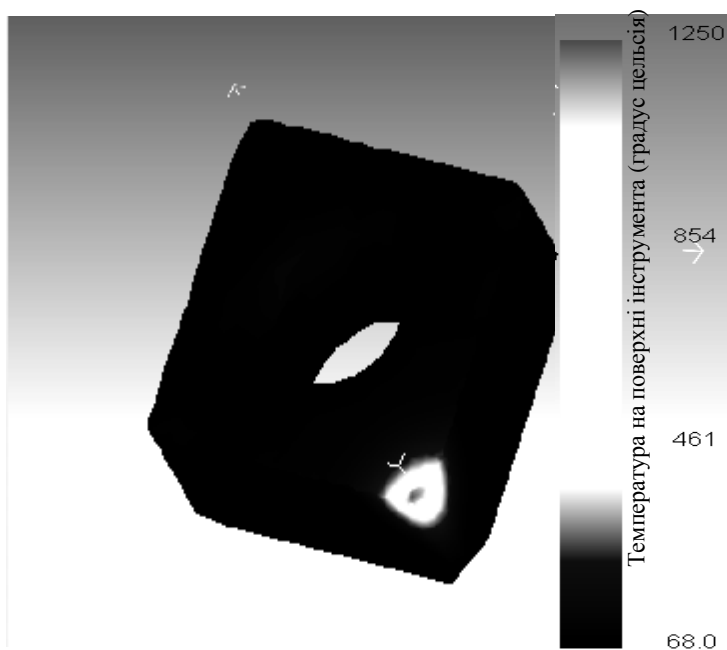
Рис. 5. Алгоритм врахування сукупного впливу термосилових процесів у зоні різання на стан різального інструменту

Розроблений алгоритм (рис. 3–5) був реалізований в системі Deform 3D, призначений для моделювання процесів деформування металу. На рис. 6 показано результати математичного моделювання розподілення нормальних напружень та температурних полів у зоні різання під час зрізання частини зміцненого шару незагартованої сталі інструментом, оснащеним НТМ.



а)

б)



в)

Рис. 6. Результати математичного моделювання в системі автоматизованого проектування Deform 3D під час зрізання частини зміцненого шару ( $h = 180$  мкм;  $H_m = 4.63$  ГПа) незагартованої сталі 40Х:

а – розподілення нормальних напружень в зоні різання; б – розподілення температурних полів в зоні різання;  
в – розподілення температурних полів на поверхнях різальної пластинки:

$$V = 200 \text{ м / хв}; S = 0.08 \text{ мм / об}; t = 0.1 \text{ мм}$$



Розроблений алгоритм моделювання процесу обробки зміцненого шару незагартованої сталі комбінованою торцевою фрезою, оснащеною НТМ, методом різання з попереднім пластичним деформуванням у подальших дослідженнях потребує експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі.

#### **Висновки:**

1. Вперше розроблено математичну модель в системі САПР Deform, що дає змогу оцінити глибину зміцненого шару та розподілення напружень після поверхневого пластичного деформування плоскої поверхні незагартованої сталі.

2. Проведене математичне моделювання дає змогу говорити про те, що глибина зміцнення поверхневого шару незагартованої сталі попереднім пластичним деформуванням дає можливість проводити обробку інструментом, оснащеним НТМ, частини зміцненого шару, причому максимально можливий припуск 120 – 150 мкм.

3. Вперше створені алгоритми моделювання термосилових процесів при обробці частини зміцненого шару незагартованої сталі.

4. За результатами проведеного математичного моделювання технологічний процес обробки попередньо зміцненої плоскої поверхні з незагартованої сталі дає можливість зменшити розподілення тепла у зоні різання до 63 %, спостерігається зменшення напружень на 81 %, на поверхні інструмента спостерігається зменшення максимальної температури на 32 % порівняно з класичним технологічним процесом.

1. *Инструменты из сверхтвёрдых материалов / Под. ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 563 с.* 2. *Виговський Г.М., Громовий О.А., Білявський М.Л. Розширення області використання торцевих фрез, оснащених НТМ // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – Вип. 2.* 3. *Виговський Г.М., Білявський М.Л. Вдосконалення методу обробки незагартованих сталей комбінованими торцевими фрезами, оснащеними ПНТМ // Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2008. – Вип. № 23.* 4. *Виговський Г.М., Громовий О.А., Білявський М.Л. Комп'ютерне моделювання глибини змінення плоскої поверхні деталі алмазним вигладжуванням // Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2007. – Вип. № 21.* 5. *Амбросимов С.К. Феноменологическая модель обрабатываемости резанием с опережающим пластическим деформированием при протягивании // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10.* 6. *Багдасарян Г.Б., Багдасарян В.Г. Определение технологических параметров инструмента при обработке хрупких материалов // Природные камни Армении. – Ереван, 2000. – С. 68–72.* 7. *Коротченко В.Л. Физические закономерности в повышении эффективности процесса резания железоуглеродистых сплавов торцевыми фрезами из гексанида-Р: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – К., 1987. – 17 с.* 8. *Крайнев Д.В. Повышение эффективности процесса резания сталей перлитного и аустенитного класса путем использования предварительного пластического деформирования: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Волгоград, 2006. – 167 с.* 9. *Цуканов В.Н. Разработка способа дробления стружки и выбор его эффективных технологических параметров при точении с опережающим пластическим деформированием специзделий из труднообрабатываемых сталей и сплавов : Автореф. ... канд. техн. наук / Моск. высш. техн. уч-ще им. Н.Э. Баумана. – М., 1987.* 10. *Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: Автореф. ... канд. техн. наук. – Курган, 1988.*