**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Зубкова Ніна Вікторівна

УДК 621.9.042

# УДОСКОНАЛЮВАННЯ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ПРИПУСКУ ШЛЯХОМ УНІФІКАЦІЇ СТРУКТУР БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ ПРОСТОРУ

Спеціальність 05.03.01 - процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі “Різання матеріалів та різальні інструменти” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Доктор технічних наук, доцент
**Кондусова Олена Борисівна,**
Харківська державна академія залізничного транспорту, професор кафедри “Матеріали і технологія виготовлення виробів транспортного призначення”.

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор
**Дерев’янченко Олександр Георгійович,**
Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри “Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство”;

кандидат технічних наук, доцент
**Тарасюк Анатолій Петрович,**
Українська інженерно-педагогічна академія, м.Харків, проректор з навчальної роботи.

Провідна установа: Донбаська державна машинобудівна академія Міністерства освіти і науки України, м.Краматорськ.

Захист відбудеться 31 жовтня 2002 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 30 вересня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Узунян М.Д.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми**. Сучасне машинобудування потребує сполучення високого рівня і якості виробів із високою продуктивністю і гнучкістю виробництва. Це забезпечується, зокрема, застосуванням автоматизованих систем проектування і виробництва CAD/CAM, геометричним ядром яких повинні бути ефективні 3D-моделі. Розвитку 3D-моделювання в країнах із розвинутим машинобудуванням приділяється велика увага.

Сучасні системи 3D-моделювання, а також універсальні CAD/CAM системи відомих фірм мають великі можливості. Проте, вони мають широке призначення і не завжди в достатній мірі враховують особливості конкретних специфічних процесів обробки різанням. Крім того, конкретне виробництво часто не потребує повного використання універсальності великих західних систем, а ліцензії на них коштують занадто дорого. Це зменшує можливість придбання таких систем українськими підприємствами.

Вітчизняне машинобудування не повинно відставати в розвитку 3D-моделювання й автоматизованих систем. При цьому в сучасних умовах найбільш актуальним і ефективним може бути створення компактних і об'єктно-орієнтованих пакетів і систем, що враховують специфічні потреби конкретного виробництва і не потребують великих витрат на придбання. Усе більше поширюються області застосування компактних гнучких середніх і малих систем і пакетів, у тому числі спеціального призначення. Така тенденція помітна зараз не тільки в Україні, але і в інших країнах із розвинутим машинобудуванням.

Ефективні спеціалізовані системи можуть входити як підсистеми або пакети CAD/CAM технологічного призначення, або можуть бути автономними. У спеціалізованих системах можна безпосередньо використовувати інформаційні бази та оптимальні рішення з теорії проектування інструментів і теорій різання та формоутворення.

Компактності та гнучкості спеціалізованих систем і зменшенню витрат на їхнє створення може також сприяти застосування в них розробленого в Україні апарату багатопараметричних відображень простору. У дослідженнях останніх років доведено, що стосовно 3D-моделювання різальних інструментів, процесів формоутворення і елементів припуску при обробці різанням цей апарат має можливості, що узагальнюють та формалізують. Дана дисертаційна робота спрямована на розвиток цих досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**. Виконання дисертаційної роботи пов’язано з держбюджетною науковою тематикою кафедри “Різання матеріалів та різальні інструменти” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” по темах: М2222 (ГР № 0100U001083) “Розробка теорії тривимірного (3D) геометричного моделювання різальних інструментів і процесів формоутворення поверхонь на основі багатопараметричних відображень афінного простору”, 1999-2001 р.р.;

М2227 (ГР № 0102U000976) “Створення теорії і методики моделювання процесів різання в тривимірному (3D) просторі на основі багатопараметричних афінних відображень”, 2002- 2004 р.р.

**Мета і задачі дослідження**. Мета дисертації - удосконалювання 3D-моделювання різальних інструментів і елементів припуску шляхом уніфікації структур багатопараметричних відображень простору.

Для виконання мети в роботі вирішуються такі задачі:

– аналіз можливостей багатопараметричних відображень щодо уніфікації та формалізації;

– уніфікація структур відображень та їх аналіз щодо практичного застосування;

– розробка методики та алгоритму 3D-моделювання, заснованих на відображеннях з урахуванням вимог уніфікації;

– розробка уніфікованих 2D- і 3D-моделей відрізків ліній, відсіків поверхонь і суцільних тіл різноманітного практичного призначення (різальні кромки, фасонні профілі, відсіки передньої та задньої поверхонь, відсіки перетинів, пластини й інші елементи деталей та інструментів);

– застосування уніфікації до процесів формування областей простору і зняття припуску на конкретних прикладах обробки різанням;

– розробка рекомендацій щодо практичного використання уніфікованих 3D-моделей у системах автоматизованого проектування, у нових запропонованих способах обробки та у навчальному процесі.

*Об'єкт дослідження* - 3D-моделювання різальних інструментів і елементів припуску при обробці різанням.

*Предмет дослідження* - уніфікація структур і операторів багатопараметричних відображень як засобу удосконалення 3D-моделювання різальних інструментів та елементів припуску при обробці різанням.

*Методи дослідження* - наукові положення теорії проектування різальних інструментів, теорії різання матеріалів і теорії формоутворення поверхонь; математичний апарат багатопараметричних відображень простору; теоретичні принципи геометричного моделювання.

Результати, висновки і рекомендації підтверджено обчислювальними комп’ютерними експериментами з застосуванням алгоритмів та моделей, розроблених автором дисертації. Достовірність теоретичних досліджень підтверджено також практичним використанням результатів. При виконанні дисертації застосовано пакети програм: Visual C++, Open GL.

**Наукова новизна одержаних результатів.** 1. Вперше запропоновано, обгрунтовано і реалізовано нову методику спільної уніфікації взаємопов’язаних структур відображень, операторів, алгоритмів геометричного моделювання й отриманих 3D-моделей різальних інструментів, оброблюваних деталей і елементів припуску при обробці різанням. 2. Встановлено і використано при уніфікації відповідність об'єктів геометричного моделювання та структур

відображень і, як слідство, відповідність цих об'єктів з алгоритмами моделювання. 3. Розроблено вихідну і конкретні структури багатопараметричних відображень, орієнтовані на уніфікацію 3D-моделювання різальних інструментів. 4. Розроблено алгоритм 3D-моделювання, заснований на багатопараметричних відображеннях, який відрізняється від існуючих урахуванням вимог уніфікації. Алгоритм містить уніфіковані блоки, що мають однакову побудову, але різне математичне наповнення для конкретних задач. 5. Виходячи з уніфікації, запропоновано варіанти класифікації 3D-моделей різальних елементів.

**Практичне значення одержаних результатів.** 1. Запропоновані методика й алгоритм уніфікації структур відображень полегшують формалізацію практичних задач. Вони можуть бути використані в інформаційних базах утворюваних вітчизняних пакетів програм і CAD/CAM систем, що враховують специфіку різальних інструментів і процесів різання. 2. Рекомендації, методика уніфікації, уніфіковані структури відображень, алгоритми і моделі використані в системі автоматизованого проектування різальних інструментів CAD T, розробленій в НТУ “ХПІ” при участі автора, а також в нових запропонованих способах розточки, вигладжування та шліфування камер горіння ДВГ і протягування фасонних каналів із змінним профілем. Впровадження результатів роботи в Інституті машин і систем (м.Харків), на НВО Завод “Електроважмаш” (м.Харків), ВАТ “Харківський верстатобудівний завод” “ХАРВЕРСТ”, ВАТ “Харківський тракторний завод” дозволяє одержати сумарний економічний ефект понад 140 тис. грн. 3. Теоретичні результати роботи використовуються в навчальному процесі при вивченні курсів “3D-моделювання в машинобудуванні” і “Основи CAD/CAM/CIM”. На базі відображень і уніфікації в курсових роботах студенти самостійно розробляють конкретні 3D-моделі та їх комп'ютерну візуалізацію. Це сприяє придбанню студентами первинних навичок не тільки користувачів, але і розроблювачів геометричних моделей і систем проектування.

**Особистий внесок здобувача.** Формулювання задач, теоретичних положень і висновків за результатами досліджень провадилося разом з науковим керівником. На основі аналізу властивостей багатопараметричних відображень простору щодо проектування різальних інструментів і уніфікації операторів особисто автором і частково з співавторами публікацій були одержані такі найсуттєвіші результати: уніфіковані вихідна та конкретні структури багатопараметричних відображень простору; алгоритм 3D-моделювання різальних інструментів та елементів припуску, що враховує уніфікацію; уніфіковані 2D і 3D-моделі, які об’єднують інструменти, оброблювані деталі, заготовки та елементи припуску при обробці різанням; рекомендації щодо використання розроблених 3D-моделей як геометричної бази CAD/CAM систем технологічного та інструментального призначення; приклади практичної реалізації теоретичних розробок.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях “MicroCAD'99”, “MicroCAD-2002” (м.Харків, 1999, 2002 р.р.), “Нові технології в машинобудуванні” (м.м.Харків-Рибальське, 2001 р.), на міжнародних науково-технічних семінарах “Interpartner’99”, “Interpartner-2000”, “Interpartner-2001” (м.Алушта, 1999-2001 р.р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні наукового семінару кафедри “Різання матеріалів та різальні інструменти” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

**Публікації**. Основний зміст дисертації викладено автором у 14 наукових працях, серед яких 12 статей у фахових наукових виданнях (з них 2 – без співавторів).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, висновків, трьох додатків. Повний обсяг дисертації - 207 сторінок, з них 17 ілюстрації по тексту, 40 ілюстрації на 28 сторінках, 2 таблиці по тексту, 2 таблиці на 5 сторінках, 3 додатки на 20 сторінках, 145 найменувань використаних літературних джерел на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У першому розділі** виконано огляд літературних джерел. Огляд свідчить про те, що в країнах із розвинутим машинобудуванням широко застосовуються і швидко розвиваються тривимірне (3D) геометричне моделювання, універсальні системи і пакети автоматизованого проектування та виробництва. Проте в цих універсальних моделях та системах недостатньо відображено специфіку різальних інструментів і процесів різання.

З другого боку, огляд літератури показав, що зусиллями відомих вітчизняних та закордонних вчених Боброва В.Ф., Весткемпера Е., Грановського Г.І., Зорєва М.М., Котова І.І., Лашнєва С.І., Новікова М.В., Опітца Х., Підкоритова А.М., Родіна П.Р., Розенберга О.М., Семенченка І.І., Семка М.Ф., Шпура Г. та інших досягнуто високого теоретичного рівня в технології різання матеріалів, проектуванні різальних інструментів і прикладній геометрії. Стосовно до нових потреб та умов сучасного машинобудування (високі технології, нові конструкційні й інструментальні матеріали, нові покриття і способи обробки) теорія різання і різальних інструментів зазнала подальшого суттєвого розвитку у працях Верещаки А.С., Внукова Ю.М., Грабченка А.І., Кавальця М., Коваленка В.С., Кундрака Я., Лієрата Ф., Мазура М.П., Малишка І.О., Проволоцького О.Є., Равської Н.С., Розенберга О.О., Усова А.В., Хорвата М., Якубова Ф.Я. та інших.

Ці досягнення можуть бути фундаментальною науковою базою для 3D-моделювання та створення і удосконалення вітчизняних компактних систем і пакетів, враховуючих специфіку різання.

В останні роки в Україні досягнуто значних результатів по рішенню цієї проблеми. З'явилися дослідження, які безпосередньо стосуються 3D-моделювання і ураховують специфіку різання та різальних інструментів. Це роботи Дерев'янченка О.Г., Доброскока В.Л., Кальченка В.І., Кондусової О.Б., Кривошиї А.В., Перепелиці Б.О., Рвачова В.Л. та інших. 3D-моделювання ефективно використано для дослідження процесу лезової та шліфувальної обробки. Розроблено теоретичні принципи 3D-моделювання інструментів, формоутворення та зняття припуску, що використовують ефективний апарат багатопараметричних відображень простору.

Дана дисертація спрямована на розвиток цих робіт. Запропонована в ній методика уніфікації структур відображень і елементів припуску повинна удосконалити 3D-моделювання різальних інструментів і зняття припуску при обробці різанням, а також полегшити формалізацію пов'язаних з цим завдань.

**У другому розділі** розроблено уніфіковану структуру відображень простору, що містить гомотетію $\bar{g}$, два обертання $\bar{\varphi}_1$ і $\bar{\varphi}_2$ навколо перехресних осей і прямолінійного переміщення $\bar{l}$ в довільному напрямку.

Інструмент, деталь і область простору, формована інструментом у його відносному русі, можуть розташовуватися і описуватися в загальних або власних реперах. Введено такі репери: репер 1 $(x_1 y_1 z_1)$, пов'язаний з інструментом; репер 2 $(x_2 y_2 z_2)$, пов'язаний з оброблюваною деталлю; нерухомий репер $(xyz)$, що у вихідному положенні збігається з репером 2. У вихідному положенні осі $z_1$ і $z_2$ схрещуються під кутом $\sigma$ на відстані $c$.

Прийнято, що при обробці інструмент обертається навколо вісі $z_1$ з кутом повороту $\varphi_1$, заготовка обертається навколо вісі $z_2$ з кутом повороту $\varphi_2$, крім того, інструмент переміщується прямолінійно під заданими кутами до осей реперу 2. Таким чином, розроблена уніфікована структура містить такі уніфіковані оператори, розташовані в порядку їхньої дії: $\bar{g}, \bar{\varphi}_1, \bar{l}, \bar{\nu}, \bar{c}, \bar{\varphi}_2$ ( $\bar{g}, \bar{\varphi}_1, \bar{l}, \bar{\varphi}_2$ - оператори відображень, $\bar{\nu}, \bar{c}$ - координатні оператори). Кожний оператор має свій параметр і свою матрицю.

Оператори діють у певній послідовності, причому кожній дії відповідає свій операторний запис: $\bar{r}_П \rightarrow \bar{g}\,\bar{r}_П \rightarrow \bar{\varphi}_1\,\bar{g}\,\bar{r}_П \rightarrow (\bar{\varphi}_1\,\bar{g}\,\bar{r}_П + \bar{l}) \rightarrow \bar{\nu}(\bar{\varphi}_1\,\bar{g}\,\bar{r}_П + \bar{l}) \rightarrow (\bar{\nu}(\bar{\varphi}_1\,\bar{g}\,\bar{r}_П + \bar{l}) + \bar{c}) \rightarrow \bar{\varphi}_2(\bar{\nu}(\bar{\varphi}_1\,\bar{g}\,\bar{r}_П + \bar{l}) + \bar{c})$.

Уніфікованій структурі відповідають операторне і матричне рівняння багатопараметричного відображення:

$$\bar{r} = \bar{\varphi}_2(\bar{\nu}\,\bar{\varphi}_1 \bar{g}\,\bar{r}_П + \bar{l} + \bar{c});\ m_r = m_{\varphi_2}(m_\nu m_{\varphi_1} m_g m_{r_П} + m_l + m_c).$$

Діями над матрицями одержано відповідні параметричні рівняння.

Вихідна уніфікована структура відображень охоплює сукупність різноманітних конкретних додатків до задач різного функціонального призначення: 1) 2D- і 3D-моделювання ліній, відсіків поверхонь і суцільних тіл (деталей і інструментів); 2) 3D-моделювання елементів припуску.

У таблиці пропонуються конкретні уніфіковані структури, одержані конкретизацією вихідної структури $\bar{\varphi}_2(\bar{\nu}\,\bar{\varphi}_1\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ (код структури 20). Кожна структура одержана виключенням тих або інших операторів, що значно спрощує її у порівнянні з вихідною структурою. Кожній конкретній структурі привласнено визначений код.

Таблиця

Уніфіковані структури відображень

| Коди | Оператори, що діють | Рівняння відображень |
|---|---|---|
| 20 | $\bar{g},\bar{\varphi}_1,\bar{\nu},\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}_2$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}_2(\bar{\nu}\,\bar{\varphi}_1\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 19 | $\bar{\varphi}_1,\bar{\nu},\bar{l}_1,\bar{l}_2,\bar{c},\bar{\varphi}_2$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}_2(\bar{\nu}\,\bar{\varphi}_1\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}_1+\bar{l}_2+\bar{c})$ |
| 18 | $\bar{g},\bar{l}_1,\bar{l}_2$ | $\bar{r}=\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}_1+\bar{l}_2$ |
| 17 | $\bar{l}_1,\bar{l}_2$ | $\bar{r}=\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}_1+\bar{l}_2$ |
| 16 | $\bar{\varphi}_1,\bar{\nu},\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}_2$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}_2(\bar{\nu}\,\bar{\varphi}_1\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 15 | $\bar{\varphi}_1,\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}_2$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}_2\,(\bar{\varphi}_1\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 14 | $\bar{\nu},\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{\nu}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 13 | $\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 12 | $\bar{l},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{r}_{\Pi}+\bar{l})$ |
| 11 | $\bar{\varphi},\bar{l}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}$ |
| 10 | $\bar{c},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{r}_{\Pi}+\bar{c})$ |
| 9 | $\bar{l},\bar{c}$ | $\bar{r}=\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c}$ |
| 8 | $\bar{g},\bar{l},\bar{c},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}+\bar{c})$ |
| 7 | $\bar{g},\bar{l}$ | $\bar{r}=\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}$ |
| 6 | $\bar{\nu},\bar{c},\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}(\bar{\nu}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{c})$ |
| 5 | $\bar{\nu},\bar{c}$ | $\bar{r}=\bar{\nu}\,\bar{r}_{\Pi}+\bar{c}$ |
| 4 | $\bar{l},\bar{s}$ | $\bar{r}=\bar{s}(\bar{r}_{\Pi}+\bar{l})$ |
| 3 | $\bar{g}$ | $\bar{r}=\bar{g}\,\bar{r}_{\Pi}$ |
| 2 | $\bar{\varphi}$ | $\bar{r}=\bar{\varphi}\,\bar{r}_{\Pi}$ |
| 1 | $\bar{l}$ | $\bar{r}=\bar{r}_{\Pi}+\bar{l}$ |

Конкретна уніфікована структура 16 може бути використана для 3D-моделювання зняття припуску при обробці фасонних деталей черв'ячними інструментами, накочуванні різьблень круглими плашками, фрезеруванні різьблень і фасонних деталей дисковими фрезами й ін. Якщо в структурі 16 прообразом прийняти відсік передньої поверхні, то рівняння відображення відповідає області простору, формованої відсіком у переміщенні інструмента щодо оброблюваної деталі.

Конкретна структура 15 відповідає задачам 3D-моделювання і зняття припуску при утворенні різьблення груповими фрезами, де прообразом служить передня поверхня інструмента; при шліфуванні круглих циліндричних деталей, де прообраз – суцільне тіло (шліфувальне коло).

Структурі 14 відповідає точіння безвершинним різцем; обробка фасонних гвинтових поверхонь фасонними різцями з додатковим нахилом.

Структура 13 може бути використана при моделюванні гвинтових або круглих тіл, зубів затилованих фрез; процесу підрізання торців.

Структури 11 і 12 можуть бути використані при 3D-моделюванні процесу зняття припуску при свердлінні, розточуванні, зенкеруванні і розгортанні отворів. Якщо оператор паралельного переносу спрямовано перпендикулярно осі обертання інструменту, реалізується схема фрезерування площин, уступів, пазів.

Уніфікована структура 9 може бути використана при моделюванні процесу протягання шлиців і шпоночних канавок.

Геометричні тіла складної форми або області простору, формовані нерівномірним рухом інструменту або його передньої поверхні, рекомендовано моделювати за допомогою структур 3, 7 і 8, що містять оператор гомотетії. Вони можуть бути реалізовані при 3D-моделюванні плоских відсіків і суцільних тіл складної форми, наприклад, кулачків, копирів, багатогранних змінних пластин.

Структура 5 застосовується для приведення репера прообразу до реперу образу.

Уніфіковані структури 1, 2, 6 і 10 у залежності від прообразу можна використовувати для моделювання різальних кромок; відсіків передньої і задньої поверхонь; відсіків осьових, торцевих і нормальних перетинів; тіл обертання; різців загального призначення, фасонних призматичних різців, шлицьових і шпоночних протяжок, різьбонарізних гребінок. Аналогічно моделюються призматичні та циліндричні тіла.

У структуру 4 введено оператор симетрії. Вона може знайти застосування при моделюванні плоских відсіків складної форми, симетричних щодо осі.

Уніфіковані структури 17, 18 і 19 реалізують моделі кривої лінії або криволінійної поверхні, задані функціональними залежностями.

Таким чином, запропонована вихідна структура відображень і отримані з неї конкретні структури при невеликій кількості використаних уніфікованих операторів охоплюють достатньо

широке коло задач 3D-моделювання різальних інструментів і зняття припуску. Це слідство узагальнюючих можливостей відображень. Та сама уніфікована структура відображень може вирішувати різні задачі моделювання в залежності від прообразу і призначення об'єкта, що моделюється.

У дисертації запропоновано і розроблено алгоритм моделювання, який враховує і використовує наскрізну уніфікацію всіх компонентів, що беруть участь у моделюванні: геометричних фігур (прообразів і образів), вихідної і конкретних структур відображень, проміжних і кінцевих 2D і 3D-моделей (рис.1).

Уніфікація виконувалася в такій послідовності:

- аналіз поля властивостей уніфікованих об'єктів, виділення і приведення до однаковості властивостей як ознак,
- систематизація об'єктів (і відповідних їм моделей) по тим або іншим ознакам, об'єднання їх у групи і розміщення в класифікаціях.

При розробці алгоритму спочатку була складена класифікація найбільш застосовуваних прообразів, потім їхнє моделювання дією операторів уніфікованої структури відображень із класифікації структур (з одночасною уніфікацією - приведенням до однаковості), потім комплектування бібліотек цих уніфікованих моделей. При цьому в алгоритмі передбачено перебирання різних уніфікованих прообразів при незмінному типі об'єкта, що моделюється, (при одній і тій же уніфікованій структурі відображень).

Алгоритм геометричного моделювання складається з блоків - уніфікованих елементів. Незалежно від об'єкта геометричного моделювання, геометрична модель фігури складається з математичного опису відображення і математичного опису прообразу.

Кожний елемент алгоритму має входи:

- із класифікації уніфікованих структур відображень для об'єкта, що моделюється, вибирається конкретна (кодована) уніфікована структура. Структура визначає, які оператори діють та у якій послідовності, і містить у собі рівняння образа (уніфікована частина моделі);
- із класифікації об'єктів, що моделюються, вибирається модель прообразу (частина моделі, що варіюється); параметри і розміри об'єкта є вхідними даними для значень і інтервалів параметрів.

Кожний елемент алгоритму має також виходи: у бібліотеку уніфікованих моделей (закінчений результат моделювання); у наступний блок алгоритму.

В алгоритмі реалізується уніфікований підхід до геометричного моделювання. На кожному етапі моделювання - від точки до лінії, від лінії до відсіку і далі до кінцевого результату поставленої задачі - використовується один і той же блок. Змінюються прообрази, перебираються уніфіковані структури, але засіб моделювання залишається однаковим. Проміжні і кінцеві образи мають виходи в бібліотеки уніфікованих моделей ліній, плоских відсіків, суцільних тіл, областей простору, що

дозволяє користувачу накопичувати і використовувати їх для рішення близьких за змістом задач. Уніфікований підхід і напрацьована інформація бібліотек дозволяє формалізувати моделювання. Наприклад, немає необхідності моделювати тіло, починаючи від точки, якщо в бібліотеці відсіків поверхонь є підхожий для використання його як прообразу.

У запропонованому алгоритмі можна користуватися також моделями, створеними іншими методами, якщо вони чисельно реалізовані, тобто задані матричними, параметричними рівняннями або масивами точок.

**У третьому розділі** досліджено сполучення геометричних властивостей деталей і інструментів як суцільних тіл і розроблено їх конкретні уніфіковані 3D-моделі. Моделі містять профілі деталей; різальні кромки; відсіки передніх і задніх поверхонь; відсіки граничних поверхонь; відсіки осьових, торцевих і інших січних площин; різальні пластини й інші елементи інструментів і деталей як суцільних тіл.

Для уніфікації було розроблено таку методику: з поля геометричних елементів виділяли групи прообразів, що мають однакові властивості, діяли на них уніфікованими структурами відображень, і одержували і кодували відповідні сімейства уніфікованих образів (відсіків і тіл). Було реалізовано перебір сімейств уніфікованих відсіків (із їхніми 2D-моделями) й уніфікованих структур відображень (із їхніми операторами і параметрами). Приклади уніфікованих відсіків і їх моделей наведено на рис.2.

Прообрази і відображення зі своїми структурами й операторами, геометричні границі з усіма їхніми властивостями мають свої математичні описи, що у сукупності і являють собою 3D-модель об'єкта.

Уніфікована 3D-модель різального інструменту, деталі або формованої області в повному записі містить операторне, матричне, параметричні рівняння відображення і нерівності, що обмежують інтервали значень параметрів. У мінімальному запису можуть бути залишені тільки один вид рівняння і нерівності. Приклад уніфікованої 3D-моделі різального інструменту наведено на рис.3.

**У четвертому розділі** за допомогою уніфікованих структур відображень, уніфікованих 3D-моделей інструментів і деталей, а також запропонованого алгоритму моделювання розроблено 3D-моделі конкретних процесів зняття припуску при обробці різанням. При цьому прошарок, що зрізається, визначено як геометричне перетинання множин точок заготовки й області простору, яка формується різальним інструментом у його відносному русі.

При моделюванні формованої області простору прообразом може бути як різальний інструмент у цілому, так і відсік його передньої поверхні.

Встановлено алгоритмічну спільність між 3D-моделюванням суцільних тіл, заповнених матеріалом, і формованих незаповнених областей простору.

3D-модель для безвершинного точіння заснована на уніфікованій структурі відображень 16. Оператори $\bar{\nu}$, $\bar{c}$ і модель різця враховують специфічні ознаки, що стосуються до характеру і розташуванню різальної кромки.

3D-моделі зняття припуску при безвершинному точінні й обробці циліндричної деталі інструментальним циліндром засновані на одній і тій же уніфікованій структурі відображень. Вони відрізняються лише моделями інструментів при однаковому точковому торканні.

**П'ятий розділ** присвячено практичному застосуванню результатів роботи.

Методика геометричного моделювання, уніфіковані структури, оператори та алгоритми були використані в системі автоматизованого проектування різальних інструментів CAD T, розробленої в НТУ "ХПІ". Приклади спроектованих у цій системі інструментів наведено в додатку.

Геометричне моделювання використано також при розробці нових способів обробки деталей з криволінійними функціональними поверхнями.

Запропоновано способи та кінематичні схеми розточки і вигладжування поверхонь деталей машин, заданих множиною кіл із змінним радіусом і змінним положенням їх центрів (наприклад, камера горіння поршня ДВГ). Оброблювану поверхню подано уніфікованою структурою відображення 18, що містить плоску гомотетію кола $\bar{g}$ (оператор 3) з одночасним рухом його центру, який здійснюється двома переносами $\bar{l}_1$ та $\bar{l}_2$ (оператори 1) (рис.4а).

Зв'язки між параметрами операторів були визначені з урахуванням характеру поверхні. 3D-модель оброблюваної поверхні з незалежними параметрами $R$ та $l_1$ має вигляд.

де $\mu$ - параметр кола.

У запропонованій кінематичній схемі контактна точка розточного або вигладжувального інструменту обертається та створює проміжну умовну інструментальну лінію - коло, а це коло, зазнаючи гомотетію та плоскопаралельний рух, створює поверхню камери горіння (рис.4б).

Гомотетія здійснюється за рахунок безперервного повороту оправки з урахуванням закону, який пов'язує коефіцієнт гомотетії з часом. Необхідна траєкторія центру інструментального кола забезпечується переміщеннями оправки з інструментом або супорта за допомогою кулачків або числового програмного управління. При цьому відсіком передньої поверхні формується певна область простору. Одержано 3D-модель цієї області.

де $u$ та $\theta$ - параметри уніфікованого відсіку конічної передньої поверхні розточного різця (код відсіку 10-2 ), $r_{\Pi}$ - радіус круглої пластини різця. В цій моделі структура відображення містить уніфіковані оператори $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{l}, \bar{\nu}, \bar{c}$ (коди операторів 2, 1, 5, 6). Масив точок простору, який належить перетинанню припуску з областю, що формується, є шар, який знімається або

деформується при розточці або вигладжуванні оброблюваної поверхні камери горіння.

Теоретичні результати дисертації використано також для розробки нового способу обробки каналів із змінним профілем методом протягування.

Складна поверхня оброблюваної порожнини з визначеним наближенням замінена гвинтовою тороїдною поверхнею. Відносний рух заготовки описано уніфікованою структурою, що містить два одночасних обертання - одне навколо осі оброблюваної порожнини і друге - навколо осі, що схрещується з віссю порожнини під прямим кутом.

Розроблено конструкцію спеціальної протяжки. Для формотворної поверхні протяжки прийнята номінальна поверхня, додана тільки гомотетія $\overline{g}_1$ у напрямку однієї з осей. Відповідно, структура формотворної поверхні містить уніфіковані оператори відображення: гомотетії $\overline{g}_1$ та обертань $\overline{\varphi}_2$, $\overline{\varphi}_3$, координатні оператори $\overline{\nu}_2$, $\overline{c}_2$ та параметр, що пов'язує два обертання.

Для кількісної оцінки розміру підрізання та зіставлення її з припустимими значеннями виконано конкретний числовий розрахунок параметрів протяжки і відхилень від номінальної поверхні для однієї з реальних оброблюваних порожнин.

Результати і рекомендації дисертації використовуються в навчальному процесі. У курсовому проекті по дисципліні “3D-моделювання в машинобудуванні” за допомогою теорії і методики багатопараметричних відображень студенти розробляють, досліджують і реалізують на комп'ютері 3D-моделі деталей та інструментів згідно заданому варіанту. При цьому використовуються уніфіковані структури й алгоритм моделювання.

У курсі “Основи CAD\CAM\CIM” поряд з вивченням різних систем автоматизованого проектування студенти виконують лабораторні роботи в системі CAD T, розробленій в НТУ “ХПІ” на основі багатопараметричних відображень та уніфікації.

Таким чином, студенти працюють не тільки як користувачі, але й одержують первинні навички розроблювачів автоматизованих систем і пакетів проектування.

## ВИСНОВКИ

1. Застосування багатопараметричних відображень простору забезпечує уніфікацію і формалізацію задач 3D-моделювання різальних інструментів і процесів зняття припуску.

2. 3D-модель різального інструменту і формованої ним області простору є сукупність математичних описів їхніх геометричних властивостей. Ці властивості визначаються прообразом, кількістю і структурою діючих відображень, функціональними зв'язками між параметрами і характером геометричних границь. Отже, уніфікація 3D-моделей зводиться до уніфікації перерахованих елементів у їхньому взаємозв'язку.

3. Розроблені в дисертації вихідна структура багатопараметричних відображень, заснований на відображеннях алгоритм 3D-моделювання і сімейства 3D-моделей відповідають

вимогам уніфікації. Вони забезпечують виділення елементів з однаковими властивостями та їхнє формалізоване уявлення у виді кодів.

4. Запропонована методика забезпечує можливість різного ступеня уніфікації і конкретизації в залежності від постановки задачі. Уніфікація структур відображень і елементів, що моделюються, може служити базою для класифікації 3D-моделей. Така можливість показана в дисертації. Визначено мінімально необхідний зміст 3D-моделей різальних інструментів, достатній для їх комп'ютерної реалізації.

5. Розроблені методику, алгоритм уніфікації і сімейства уніфікованих 3D-моделей рекомендується застосовувати при створенні й удосконалюванні компактних і ефективних вітчизняних пакетів і автоматизованих систем, орієнтованих на технологію обробки різанням. Методику 3D-моделювання за допомогою багатопараметричних відображень у тісному зв’язку з уніфікацією і компактною комп’ютерною реалізацією доцільно використовувати в навчальному процесі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Перепелица Б.А., Кундрак Я., Сашкова Н.В. Аналитическое определение кинематических геометрических параметров при точении и растачивании полигонных поверхностей // Резание и инструмент. – 1987.– Вып.37.-С. 43-47.

2. Кондусова Е.Б., Сашкова Н.В. Приложение многопараметрических отображений к моделированию съёма припуска при точении безвершинным резцом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ.– 1999. – Вып. 32. – С. 113-117.

3. Алгоритм геометрического моделирования режущего инструмента как композиции из элементов, описанных многопараметрическими отображениями/ Кондусова Е.Б., Мироненко А.Л., Сашкова Н.В., Федорова О.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 54. - С. 143-146.

4. Родин П.Р., Кондусова Е.Б., Сашкова Н.В. Особенности съема припуска при механической обработке цилиндрических деталей инструментальным цилиндром // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ. - 1999.- Вып. 43.- С.68-73.

5. Зубкова Н.В. Особенности снятия припуска при обработке круглых фасонных деталей инструментами с фасонной инструментальной поверхностью вращения // Резание и инструмент в технологических системах. - Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ.– 1999.– Вып. 55. - С. 123-128.

6. Кондусова Е.Б., Сашкова Н.В. О геометрической интенсивности съема припуска при обработке резанием // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ.– 1999.-Вып. 47.- С.52-55.

7. Зубкова Н.В., Кондусова Е.Б., Третяк Т.Е. Матричные описания условия касания и кинематических углов при обработке резанием // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ.– 2001.– Вып. 59 - С.106-110.

8. Кондусова Е.Б., Зубкова Н.В. Анализ геометрических свойств способов обработки резанием плоскостей, уступов и пазов // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Нац. аэрокосмического ун-та им. Н.Е.Жуковского "ХАИ".-Харьков. –2001.-Вып. 24.- С.26-31.

9. Зубкова Н.В., Кондусова Е.Б., Тимофеева Л.А. Кинематическая схема и геометрическое моделирование формообразования поверхностей, образованных окружностями с переменным радиусом // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ "ХПІ".-Харків. – 2001 - Вип.1. - С.141-144.

10. Перепелица Б.А., Зубкова Н.В., Кондусова Е.Б. Применение систем параметров отображений для определения пересечения и объединения геометрических фигур // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ "ХПІ".-Харків. – 2001. - Вип.1 – С.205-208.

11. Кондусова Е.Б., Зубкова Н.В. 3-D модель съема припуска при обработке цилиндрическими фрезами // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Нац. аэрокосмического ун-та им. Н.Е.Жуковского "ХАИ". – Харьков.– 2001. – Вып. 25. - С.128-133.

12. Формообразование каналов с переменным профилем методом протягивания / Перепелица Б.А., Кондусова Е.Б., Тимофеева Л.А, Зубкова Н.В. // Резание и инструмент в технологических системах. - Межд. научн.-техн. сборник.– Харьков: ХГПУ.– 2001.– Вып. 60. - С. 190-192.

13. Зубкова Н.В. Конкретные структуры отображений для частных задач // Надійність інструменту та оптимизація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2001. - Вип. 11.– С.72-77.

14. Исходная структура многопараметрических отображений, используемая для унификации 3D-моделирования режущих инструментов и съема припуска при обработке резанием / Зубкова Н.В., Тимофеева Л.А., Кондусова Е.Б., Кушнаренко О.Н. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я.: Анотації доповідей міжн.наук.-прак.конф. 16-17 травня 2002 р., Харків. – С. 104-105.

## АНОТАЦІЇ

Зубкова Н. В. Удосконалювання 3D-моделювання різальних інструментів і елементів припуску шляхом уніфікації структур багатопараметричних відображень простору - *Рукопис*.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01- процеси механічної обробки, верстати та інструменти. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002.

У дисертації запропоновано спільну уніфікацію структур відображень, алгоритмів 3D-моделювання й отриманих 3D-моделей різальних інструментів, оброблюваних деталей і елементів припуску при обробці різанням. Розроблено вихідну і конкретні структури багатопараметричних відображень простору, орієнтовані на уніфікацію 3D-моделей. Ці структури охоплюють багато задач геометричного моделювання інструментів, деталей та елементів припуску при різанні. Розроблено алгоритм 3D-моделювання, заснований на багатопараметричних відображеннях, який відрізняється від існуючих урахуванням вимог уніфікації. Алгоритм містить уніфіковані блоки, що мають однакову побудову, але різне математичне наповнення для конкретних задач.

Уніфікація забезпечує компактність формалізації. Отримані сімейства уніфікованих 3D-моделей можуть бути використані в інформаційних базах утворюваних вітчизняних пакетів і автоматизованих систем, що враховують специфіку різальних інструментів і процесів різання.

Рекомендації, уніфіковані алгоритми і моделі практично використані в системі автоматизованого проектування різальних інструментів CAD T, створеної в НТУ “ХПІ”, при розробці нових способів обробки деталей із складними функціональними поверхнями, а також у навчальному процесі при вивченні курсів “3D-моделювання в машинобудуванні”, “Основи CAD/CAM/CIM”.

Ключові слові: 3D-модель, різання, різальні інструменти, деталі, елементи припуску, багатопараметричні відображення простору, уніфікація.

*Зубкова Н.В. Совершенствование 3D-моделирования режущих инструментов и элементов припуска путем унификации структур многопараметрических отображений пространства – Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01- процессы механической обработки, станки и инструменты. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002.

В диссертации предложена совместная унификация структур отображений, алгоритмов 3D-моделирования и полученных 3D-моделей режущих инструментов, обрабатываемых деталей и элементов припуска при обработке резанием.

Отображение создает образ, действуя операторами на прообразы. Поэтому при 3D-моделировании геометрических объектов как образов задавались унифицированные прообразы и действующие унифицированные отображения с их операторами.

Предлагаемая исходная структура отображений и полученные из нее частные унифицированные структуры при небольшом количестве используемых унифицированных операторов охватывает достаточно широкий круг задач 3D-моделирования режущих инструментов и съема припуска. Это следствие обобщающих возможностей отображений. Одна и та же унифицированная структура может решать разные задачи моделирования в зависимости от прообраза и назначения моделируемого объекта.

Разработан алгоритм 3D-моделирования, основанный на многопараметрических отображениях и отличающийся от существующих учетом требований унификации. Алгоритм включает унифицированные блоки, имеющие одинаковое построение, но разное математическое наполнение для конкретных задач. На входах в блоки вводится унифицированная и закодированная информация о структурах и компонентах отображений, на выходах выводятся унифицированные модели.

При разработке алгоритма была составлена классификация наиболее применяемых прообразов, затем их моделирование действием операторов унифицированной структуры отображений из классификации структур, затем комплектование библиотек полученных моделей.

Унифицированы различные прообразы и образы: профили деталей; режущие кромки; отсеки передних и задних поверхностей; отсеки граничных поверхностей; отсеки осевых, торцовых, главных и нормальных секущих плоскостей; режущие пластины, зубья и другие элементы инструментов и деталей как сплошных тел.

Предлагаемые унифицированные 3D-модели режущих инструментов, деталей или формируемых областей в полной записи содержат операторное, матричное, параметрические уравнения отображения и неравенства, содержащие интервалы значений параметров. В минимальной записи могут быть оставлены только один вид уравнения и неравенства.

Унифицированные структуры отображений, унифицированные 3D-модели инструментов и деталей и предложенный алгоритм моделирования позволяют разрабатывать 3D-модели конкретных процессов съема припуска при обработке резанием. При этом срезаемый слой определяется как геометрическое пересечение множеств точек заготовки и области пространства, формируемой режущим инструментом в его относительном движении. Установлена алгоритмическая общность между 3D-моделированием сплошных тел, заполненных материалом и формируемых незаполненных областей пространства. При моделировании формируемой области в качестве прообраза может рассматриваться как режущий инструмент в целом, так и отсек его передней поверхности.

Унификация обеспечивает компактность формализации. Полученные семейства унифицированных 3D-моделей могут быть использованы в информационных базах создаваемых отечественных пакетов и автоматизированных систем, учитывающих специфику режущих

инструментов и процессов резания. Рекомендована методика структурного моделирования, которая оперирует унифицированными структурами отображений без аналитических уравнений и формул, выведенных для конкретных случаев.

Рекомендации, унифицированные алгоритмы и модели практически использованы в системе автоматизированного проектирования режущих инструментов CAD T, созданной в НТУ “ХПИ” с участием автора диссертации. Обобщение в этой системе различных задач проектирования инструментов стало возможным благодаря применению единого математического аппарата многопараметрических отображений в сочетании с унификацией.

Предложенная методика моделирования использована при разработке новых способов обработки деталей со сложными функциональными поверхностями (камер сгорания ДВС, фасонных каналов с переменным профилем и др.) и применяется в учебном процессе при изучении курсов “3D-моделирование в машиностроении” и “Основы CAD/CAM/CIM”.

Ключевые слова: 3D-модель, резание, режущие инструменты, детали, элементы припуска, многопараметрические отображения пространства, унификация.

*Zubkova N.V. Improvement of 3D-modelling of cutting tools and elements of allowance by means of unification of structure of multiparametric space reflection - Manuscript.*

Dissertation on degree of candidate of technical science, speciality 05.03.01 - processes of mechanical machining, machines and tool. National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”, Kharkov, 2002.

In the dissertation the combined unification of reflection structures, 3D-modelling algorithms, and the obtained 3D-models of cutting tools, machined parts, and elements of allowance is proposed.

The generalized structure of multiparametric space reflection and its derivatives obtained for particular cases have been worked out. The structures allow to unify 3D-models for a lot of tasks of geometric modelling of cutting tools, elements of allowance, and machined parts.

The algorithm of 3D-modelling based on multiparametric reflections is proposed. The algorithm corresponds to requirements of the unification and it is the main difference between the algorithm and the existing ones. It includes unified blocks that have the same structure but the different mathematical contain for a specific tasks.

The unification facilitates the compactness of the formalization. The obtained classes of the unified 3-D models can be used in the databases of different toolboxes and computer-integrated systems that take into account cutting tools and cutting process.

The unified algorithms, the models, and recommendations for their usage have found practical application in CAD-system of cutting tools “CAD T”, designed at National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”, for elaboration of new methods for machining of combustion chamber

of internal-combustion engine, also in educational process in courses “3D-modelling in mechanical engineering” and “Base of CAD/CAM/CIM”.

Key words: 3D-models, cutting, cutting tools, parts, elements of allowance, multiparametric space reflection, unification.