

## РОЗДІЛ III. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.9.01:658.564

Ю.В. Петраков, д-р техн. наук

Ю.В. Тишкевич, аспірант

НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

### ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РІЗАННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КІНЦЕВОЮ ФРЕЗОЮ

У статті викладена методика вирішення нелінійної задачі оптимізації для операції фрезерування кінцевими фрезами. Представлена прикладна програма, що дозволяє автоматично визначити оптимальний режим фрезерування для десяти видів оброблюваних матеріалів і п'яти марок інструментальних матеріалів кінцевих фрез. Встановлено, що залежність продуктивності від глибини припуску і ширини обробки має екстремальний характер, що дозволяє призначати оптимальні сполучення цих параметрів під час проектування управляючої програми верстата з ЧПУ за допомогою САМ систем.

**Вступ.** Операція фрезерування кінцевою фрезою часто використовується для оброблення 3D поверхонь різних деталей на верстатах з ЧПК. При технологічній підготовці такої операції використовують інтегровані CAD/CAM системи, що дозволяють отримати управляючу програму оброблення у G-кодах. Всі відомі системи автоматизованої підготовки управляючих програм вимагають від технолога-програміста завдання багатьох параметрів майбутнього процесу різання і не дають жодних рекомендацій для вибору таких параметрів [1]. Отже, технолог-програміст під час вирішення такого надважливого завдання користується довідниками, власним досвідом або, в найкращому випадку, рекомендаціями фірми-виробника інструменту. Проте саме від призначеного режиму різання залежить продуктивність операції і виконання всіх вимог за якістю деталі.

Наприклад, під час проектування операції фрезерування 3D поверхонь на верстаті з ЧПК перед технологом-програмістом постає проблема: як швидше обробити заготовку – за один чи два проходи, або за більшу кількість проходів (рис. 1)? Найчастіше така проблема вирішується вибором одного проходу, що при «ручному» призначенні режиму різання приводить до значних втрат продуктивності. Такий стан не може задовольняти сучасне виробництво, коли верстат з ЧПК може реалізовувати будь-який режим різання (звичайно, в обмеженому конструкцією діапазоні), а його можливості не використовуються.

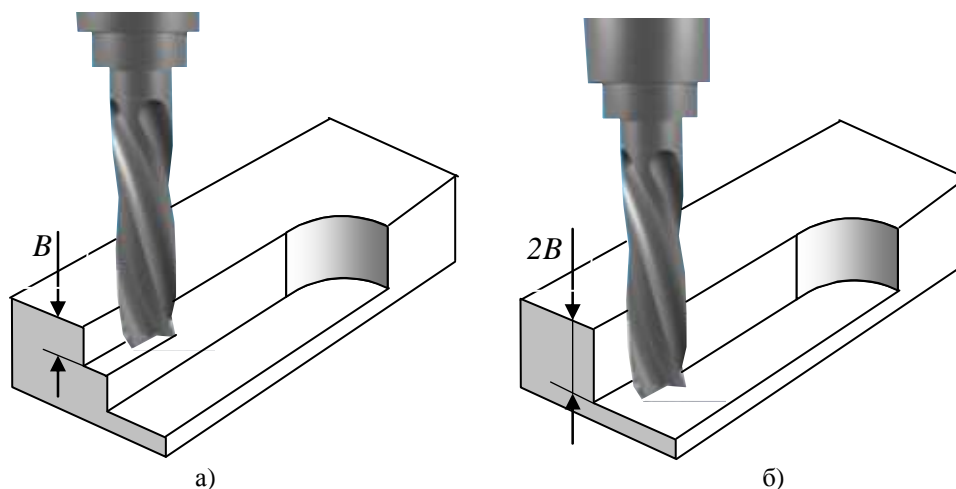


Рис. 1. Фрезерування кінцевою фрезою:  
а) на ширину  $B$  – за два проходи; б) на ширину  $2B$  – за один прохід

Крім того, відомо, що будь-який процес різання є квазістаціонарним і для ефективного управління необхідно послідовно вирішувати три завдання: 1) стабілізація умов різання; 2) оптимізація процесу; 3) корекція формоутворюючої траєкторії [1]. Саме вирішенню другого завдання під час фрезерування кінцевими фрезами і присвячена ця стаття.

**Постановка проблеми.** Під час оброблення деталей на сучасних верстатах з ЧПК задача оптимізації може бути сформульована таким чином [2]. Знайти таке поєднання складових режиму різання, коли основний час буде мінімальним, а всі обмеження за конструктивними параметрами верстата, заданою стійкістю інструмента, якістю обробленої поверхні будуть виконані.

**Вирішення задачі.** Сформульована задача оптимізації зведена до однокритеріальної, розв'язок якої знаходять, відшукуючи такі невід'ємні значення управляючих впливів (подачі  $S$  і частоти  $n$  обертання шпинделя інструмента) при задоволенні всім обмеженням, що доставляють мінімум критерію оптимальності – основному часу  $t_0$ . Таким чином, для випадку фрезерування кінцевою фрезою оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь і нерівностей.

Зв'язок між управлінням  $S$  і  $n$  та періодом  $T$  стійкості інструмента, що визначають його різальну спроможність, одержують за відомою з теорії різання залежністю:

$$V = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{C_v D^{q_v} k_v}{T^m H^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}},$$

звідки:

$$n S_z^{y_v} = \frac{1000 C_v D^{q_v} k_v}{\pi D T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}} = \frac{318 C_v D^{q_v-1} k_v}{T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}}. \quad (1)$$

Оскільки всі залежності, що складають математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про розмірності фізичних величин, що до них входять. Традиційно ці розмірності не відповідають СІ розмірностям. Так, у залежності (1) частота обертання –  $n$  (об/хв), подача –  $S_z$  (мм/зуб), глибина різання –  $H$  (мм), період стійкості –  $T$  (хв), діаметр інструмента –  $D$  (мм), ширина фрезерування –  $B$  (мм), кількість зубців фрези –  $z$ , коефіцієнти і показники емпіричної залежності швидкості різання від режиму обробки –  $C_v$ ,  $k_v$ ,  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $u_v$ ,  $q_v$ ,  $m$ ,  $p_v$ .

Потужність різання  $N_p$  (кВт):

$$N_p = \frac{P_z V}{6 \cdot 10^4} = \frac{P_z \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_p H^{x_{Pz}} S_z^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot D^{q_{Pz}} \cdot n^{w_{Pz}}} \leq N_{cm} \eta,$$

звідки:

$$n^{1-w_{Pz}} \cdot S_z^{y_{Pz}} \leq \frac{6 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D^{1-q_{Pz}} \pi} = \frac{1.91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D^{1-q_{Pz}}}, \quad (2)$$

де  $N_{cm}$  – ефективна потужність верстата у кВт,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії,  $C_{Pz}$ ,  $k_{Pz}$ ,  $x_{Pz}$ ,  $y_{Pz}$ ,  $u_{Pz}$ ,  $q_{Pz}$ ,  $w_{Pz}$  – коефіцієнти і показники емпіричної залежності сили різання від режиму фрезерування.

Принципальна кінематична схема при фрезеруванні базується на об'єднанні двох рівномірних рухів: обертального і поступального, які відбуваються в площині, перпендикулярній до осі фрези. Тому траєкторія відносного робочого руху будь-якої точки леза є подовжена циклоїда (трохоїда). Висота трохойди дорівнює діаметру фрези, а відстань між її петлями дорівнює шляху, який проходить деталь за один оберт фрези. Траєкторія руху лез окремих зубів зсунуті одне відносно одного на відстань  $S_z$ , що дорівнює  $S/z$ . При відношенні швидкості руху деталі до швидкості обертання фрези, які мають місце при фрезеруванні, дуга трохойди за формою ненабагато відрізняється від дуги

кола. Тому трохоїду можна замінити колом з діаметром, який дорівнює діаметру фрези. При цьому похибка від вказаної заміни в реальних умовах не буде перевищувати 1%.

Максимальна висота гребінця, що утворює детерміновану складову  $h_z$  мікрорельєфу при фрезеруванні, може бути визначена за геометричними співвідношеннями (рис. 2), де показані два положення зуба фрези при обробці поверхонь різної кривизни. Причому, оскільки центр фрези рухається за формоутворюючою траєкторією з певною подачею, то подача  $S_z$  на зуб визначається також за цією траєкторією. Отже, при фрезеруванні випуклої або увігнутої поверхні:

$$h_z = \sqrt{(R_k \pm R_\phi)^2 - (S_z / 2)^2} \mp R_k - R_\phi \sin \alpha, \quad (3)$$

де верхні знаки – при фрезеруванні випуклої поверхні, нижні – увігнутої,  $R_k$  – радіус кривизни (випукла поверхня – знак «+» увігнута – знак «-»),  $R_\phi$  – радіус фрези, – подача на зуб фрези, кут  $\alpha = \arccos(S_z / 2R_\phi)$ .

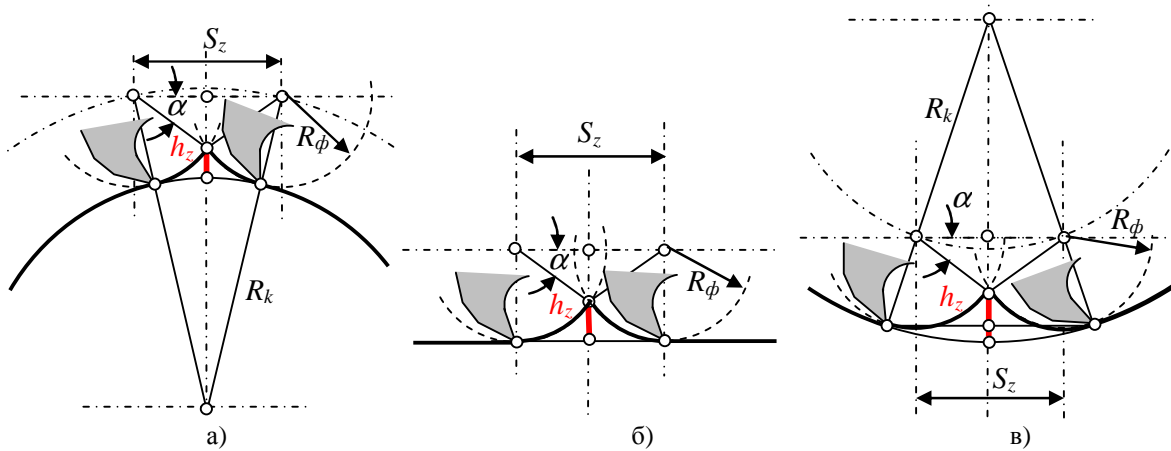


Рис. 2. До визначення шорсткості:

а) випукла поверхня; б) площина; в) увігнута поверхня

При фрезеруванні плоскої поверхні висота  $h_z$  розраховується за залежністю:

$$h_z = R_\phi - \sqrt{R_\phi^2 - (S_z / 2)^2}. \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) залежно від фактичної кривизни поверхні у місці, що обробляється, можна визначити обмеження, яке накладається на подачу на зуб  $S_z$  залежно від параметра  $R_z$  шорсткості поверхні:

$$S_z \leq [S_{Rz}]_{\text{дон}}. \quad (5)$$

Обмеження за міцністю інструмента може бути визначене за емпіричною залежністю, яка рекомендована в [3]:

$$[S_z]_{\text{ин.дон}} = C \frac{D^{5.21}}{(Bz\sqrt{kl^2} + D^2)^{1.35} H^{1.16}}, \quad (6)$$

де  $D, l, z$  – діаметр і довжина вильоту і кількість зубців фрези,  $B, H$  – ширина і глибина фрезерування,  $C, k$  – емпіричні коефіцієнти (наприклад, для матеріалу заготовки Сталь 30:  $C = 0,56$ ;  $k = 2,56$ ).

Наступне обмеження обирається з умови максимально допустимої сили подачі, що забезпечує привод верстата. Тобто складова  $P_x$  сили різання має відповідати нерівності:

$$1,2 \cdot P_x \leq P_n, \quad (7)$$

де  $P_n$  – максимально допустима сила привода подачі верстата.

Звідки, за відомими залежностями теорії різання, маємо таке обмеження:

$$[s_p]_{don} = \left( \frac{P_n D^{q_{Pz}} n^{w_{Pz}}}{1.2 \cdot C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}} \right)^{\frac{1}{y_{Pz}}} \quad (8)$$

Під час формування обмежень, мають бути обов'язково враховані конструктивні обмеження, що визначаються за можливостями металорізального верстату:

– діапазон подач:

$$s_{min} \leq s \leq s_{max} \quad (9)$$

– діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max} \quad (10)$$

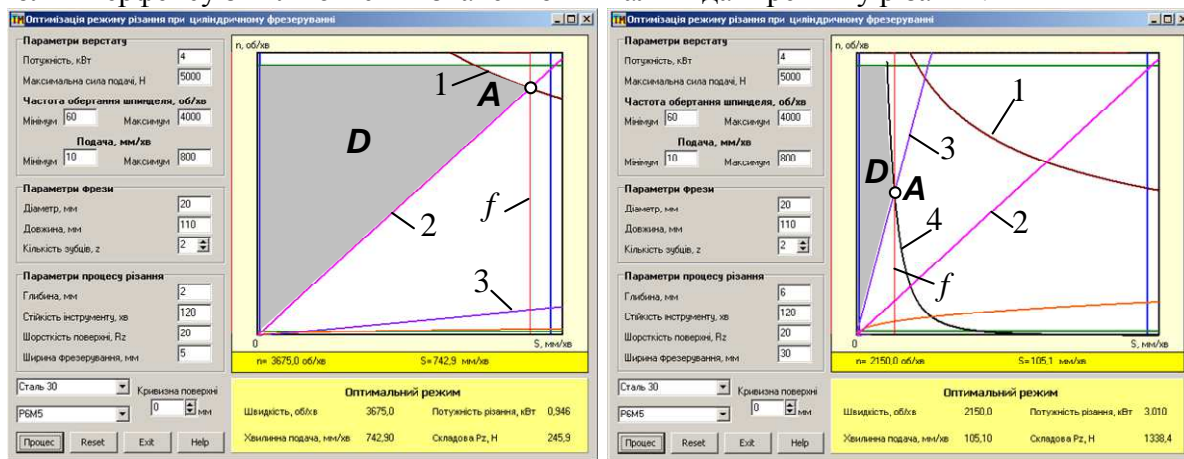
Аналіз сформульованої задачі оптимізації та визначених вище обмежень дозволяє вирішувати задачу у фазовій площині “ $s_{xв} - n$ ”, тобто хвилинна подача – частота обертання шпинделя інструмента. В такому разі у якості оцінної функції за критерієм максимальної продуктивності можна прийняти приймають:

$$f = s_{xв} \rightarrow max \quad (11)$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_o = \rightarrow min$ .

Для розв'язання задачі оптимізації була розроблена прикладна програма, ядро якої складає одержана вище математична модель (1) – (10). Емпіричні коефіцієнти і показники ступеня в математичних моделях, що застосовані, були взяті з довідника [4].

На інтерфейсі, зліва, у відповідні віконця вводяться вихідні дані верстата, інструмента і параметри процесу різання, у меню, що випадає, обирається матеріал заготовки і інструмента, кривизна поверхні і натискається кнопка «Процес» (рис. 3). Прикладною програмою передбачено використання десяти видів матеріалів заготовки і п'яти марок інструментальних матеріалів. Після цього у графічному вікні, справа, з'являються обмеження у вигляді ліній на фазовій площині “ $s_{xв} - n$ ”. При переміщенні курсору мишки у графічному вікні пересувається вертикальна лінія  $f$ , що представляє оцінну функцію (11). Для визначення оптимального режиму різання достатньо перевести мишку так, щоб лінія  $f$  торкалася справа максимально віддаленої від осі частот обертання вершини області  $D$  допустимих значень, а перехрестя курсору знаходилось на вершині (точка  $A$  на рис. 3). У такому положенні треба натиснути праву клавішу мишки і у відповідному полі інтерфейсу з'являються визначені оптимальні дані режиму різання.



а)

б)

а) глибина різання 2 мм, ширина 5 мм; б) глибина різання 6 мм, ширина 30 мм

Рис. 3. Інтерфейс прикладної програми оптимізації

Для вирішення задачі визначення оптимального сполучення глибини і ширини фрезерування за допомогою створеної програми були проведені дослідження залежності оптимального режиму різання від таких параметрів фрезерування.

Відповідно до задач нелінійного програмування, оптимальна точка знаходиться на вершині області можливих значень, що найбільш віддалена від початку координат – точка *A* на рисунку 1. Як і очікувалось, при зміні вихідних параметрів процесу різання (глибини і ширини) оптимальний режим визначається перетином різних обмежень: на рис.3, *a* – точку *A* утворюють обмеження 1 – за стійкістю інструменту і обмеження 2 – за шорсткістю поверхні, а на рис. 3, *б* – точку *A* утворюють обмеження 3 – за міцністю фрези і обмеження 4 – за потужністю верстата.

Результати виконаних досліджень представлені на рисунку 4. Під час оцінювання продуктивності за максимальною швидкістю зрізування припуску ( $P = BHS_{xв} \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) була виявлена наявність екстремуму: для кожної глибини різання існує своє значення оптимальної ширини фрезерування.

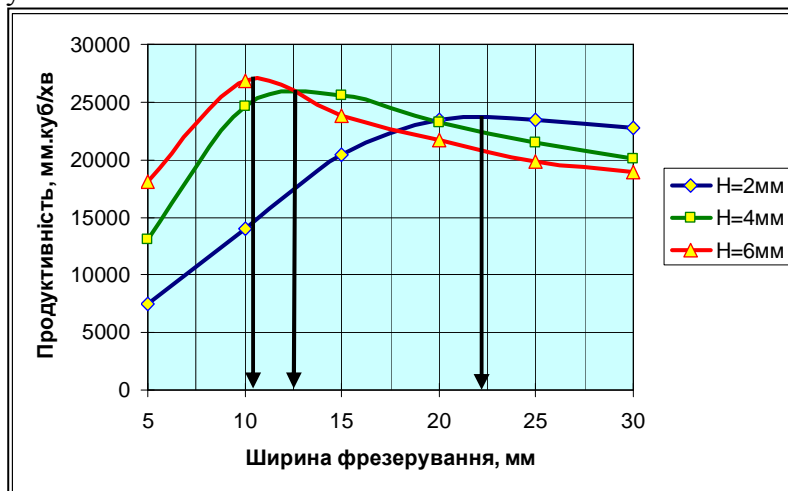


Рис. 4. Залежність продуктивності оброблення від ширини і глибини фрезерування

Аналіз отриманих результатів показує, що, наприклад, при заданій ширині фрезерування 25 мм з глибиною припуску 4 мм доцільно виконувати оброблення не за один прохід, тобто зразу на всю задану ширину фрезерування, а за два проходи (рис. 1). При цьому продуктивність оброблення підвищується у 1,2 рази. Причому, чим більша глибина припуску, тим більший вигаш дає застосування оптимального режиму різання.

Крім того, оскільки розв’язок задачі оптимізації відбувається у фазовій площині “ $s_{xв} - n$ ” за областю, що утворена обмеженнями, якість обробленої поверхні гарантується.

#### Висновки.

1. Визначено аналітичні залежності висоти гребінця, що утворюється при фрезеруванні, від параметрів режиму різання і кривизни поверхні, що обробляється, які визначають обмеження за шорсткістю при розв’язанні задачі оптимізації.

2. Доведено, що залежності продуктивності фрезерування від ширини і глибини оброблення мають екстремум, що надає можливість при призначенні режиму різання для операцій фрезерування кінцевими фрезами на верстаті з ЧПУ обирати оптимальні сполучення цих параметрів.

3. Створена прикладна програма може бути рекомендована як засіб попереднього проектування управляючої програми для верстата з ЧПУ, яка автоматично визначає саме ті параметри, що вимагаються будь-якою САМ системою.

#### Список використаних джерел

- Петраков Ю. В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: монографія / Ю. В. Петраков. – К.: Січкар, 2011. – 222 с.
- Петраков Ю. В. Лабораторно-комп’ютерний практикум з теорії різання / Ю. В. Петраков. – К.: Політехніка, 2006. – 190 с.

3. Гжиров Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ / Р. И. Гжиров, П. П. Серебряницкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

УДК 658.286

**Г.В. Пасов**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

## ІСТОРІЯ СТАНОВЛЕННЯ ЛУЦЬКОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ЗАВОДУ ТА ЙОГО ПЕРСПЕКТИВИ

*Розглянуто історію розвитку вітчизняного заводу з випуску вантажних, легкових та спеціалізованих автомобілів Луцького автомобільного заводу. Описано основні моделі, які випускало це підприємство, та перспективи його подальшого розвитку.*

*Рассмотрена история развития отечественного завода по выпуску грузовых, легковых и специализированных автомобилей Луцкого автомобильного завода. Описаны основные модели, выпускаемые этим предприятием, и перспективы его дальнейшего развития.*

*The history of the development of the domestic plant is considered on issue of the cargo cars, passenger and specialized cars. It is described main models, which were released on this enterprise and prospects of the further its development.*

**Вступ.** Автомобілебудівна галузь відноситься до машинобудівного комплексу. Машинобудування на території сучасної України виникло ще в середині ХІХ ст. Наявність металу, вигідне транспортно-географічне розташування, зокрема, вихід до узбережжя Чорного та Азовського морів, висока концентрація сільськогосподарського виробництва сприяли розвитку тут важкого, транспортного і сільськогосподарського машинобудування [7].

У переважній більшості розвинутих країн світу провідне місце у структурі транспортного машинобудування займає автомобілебудування. Україна має досить сприятливі передумови для розвитку автомобілебудування: достатнє виробництво металу, розвинута хімічна промисловість, науково-дослідна база і достатня чисельність кваліфікованих кадрів і, що дуже важливо, великий ринок збуту продукції.

В автомобілебудуванні нашої країни сформувалась чітка спеціалізація підприємств на випуск окремих типів машин. Виникнувши в силу особливостей свого розміщення у промислово розвинутих районах України, де були найбільш сприятливі умови для організації внутрішньої і міжгалузевої кооперації, автомобілебудування зараз почало розвиватися і в нових економічних районах [8; 2; 4].

Як відомо, в колишньому Радянському Союзі виробництво автотранспортних засобів розміщувалося нерівномірно (велика частина автозаводів і заводів з випуску комплектуючих виробів знаходилась в Росії). Проте майже кожна колишня республіка СРСР мала (і зберегла) монопольне виробництво якого-небудь виробу. Україна є виробником середніх міських, усіх видів туристичних та міжміських автобусів, великовантажних лісовозів, трюбовозів і багатоцільових автомобілів, автосамонавантажувачів вантажопідйомністю 5 т і вище, а також легкових малолітражних автомобілів першої групи (типу “Таврія”) [1; 3].

Оскільки українське автомобілебудування значною мірою залежало від постачання комплектуючих з країн СНД, що виробилося ще за часів існування Союзу, то економічна самостійність зруйнувала майже всі економічні зв'язки, що привело до занепаду галузі. Так, у порівнянні з 1990 роком, випуск продукції в 1999 році скоротився майже на 87 %.

Автомобілебудування – це одна з галузей машинобудування, що належить до галузей “вільного розміщення”, на які менше, ніж на інші галузі, впливають чинники розміщення.

Спеціалізація зумовлює розширення кооперації виробництва. Автомобільні підприємства кооперуються з іншими галузями промисловості – хімічною, металургійною,