

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Полянський Володимир Іванович

УДК . 621.923:681.2

ДИСЕРТАЦІЯ

ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЗНИЖЕННЯ  
ТРУДОМІСТКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНОЇ  
ФОРМУЮЧОЇ ОСНАСТКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування  
13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ідентичність за змістом \_\_\_\_\_ *В.І. Полянський*

*З першим примірником  
дисертації засвідчую.*

*Вчений секретар  
спеціального вченої  
ради*

*А.В. Осипенко*  
*16.02.21* *У. Зубова Н.В.*



Науковий консультант:  
Новіков Федір Васильович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Полянський В. І.* Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми теоретичного визначення й обґрунтування умов суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності й зниження трудомісткості механічної обробки шляхом зниження її теплової й силової напруженостей та на цій основі розроблення ефективних технологічних процесів обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями. Науковою новизною отриманих результатів є те, що вперше розроблено теоретичні підходи до визначення технологічних можливостей підвищення якості та зниження трудомісткості механічної обробки за рахунок зниження її теплової й силової напруженостей. Розроблено спрощені математичні моделі визначення температури різання при шліфуванні та лезовій обробці, які засновані на урахуванні балансу тепла, що виникає в зоні різання та надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, стружки, що утворюється, та охолоджувальну рідину. Вперше проведено узагальнення теоретичних рішень щодо визначення параметрів теплового процесу при механічній обробці із урахуванням досягнення кінцевого значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі. Встановлено основний напрямок зниження температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки,

який полягає в зниженні максимальної температури різання до рівня та нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це дозволяє досягти значного підвищення продуктивності обробки фактично без підвищення температури різання. Вперше запропоновано новий універсальний технологічний параметр механічної обробки – максимальну температуру різання, при досягненні якої все тепло, що виділяється при різанні, надходить в стружку, і яка визначається відношенням енергоємності обробки до добутку питомої теплоємності і щільності оброблюваного матеріалу. Це дозволяє порівнювати максимальну температуру різання із температурою плавлення оброблюваного матеріалу та в разі перевищення застосовувати технологічні прийоми її зниження для різних технологій механічної обробки. Встановлено, що зниження енергоємності обробки (умовного напруження різання) є основною умовою зниження максимальної температура різання та, відповідно, температури різання. Показано, що відмінність розрахункових і експериментальних значень температури різання при шліфуванні не перевищує 12%, що вказує на достовірність розробленої математичної моделі визначення температури різання.

Розрахунками встановлено, що в реальних умовах шліфування відношення заданої і максимальної температур шліфування може змінюватися лише в межах  $0 \dots 0,4$  в зв'язку із перевищенням максимальною температурою різання температури плавлення оброблюваного матеріалу внаслідок значного збільшення умовного напруження різання. При точінні це відношення може змінюватися в значно більших межах  $0 \dots 1$ . Тому максимальна температура різання при точінні буде менше, ніж при шліфуванні і може приймати значення, які менші температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це розширює технологічні можливості точіння порівняно із шліфуванням.

Вперше встановлено, що найбільш значного зниження температури різання при шліфуванні можна досягти при переривчастому шліфуванні в умовах рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга та збільшення кількості робочих виступів круга. У цьому випадку температура

різання може бути знижена більш ніж в 2 рази щодо температури різання при шліфуванні суцільним кругом. Однак максимальна температура різання при цьому приймає значення, які значно вищі температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це обмежує технологічні можливості переривчастого шліфування порівняно із лезовою обробкою.

Вперше розширено технологічні можливості математичної моделі визначення температури різання при лезовій обробці, яка заснована на урахуванні кількості виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу. Встановлено, що з їх збільшенням температура різання може збільшитися до 10 разів. Це можливо при шліфуванні в умовах безперервного контакту зв'язки шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. При лезовій обробці кількість виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу незначна, що дозволяє знизити температуру різання та підвищити якість і продуктивність обробки.

Встановлено, що розроблені в роботі математичні моделі визначення температури різання при механічній обробці позитивно відрізняються від відомих моделей, оскільки аналітично пов'язують всі основні параметри теплового процесу при різанні: температуру різання, максимальну температуру різання, глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, градієнт температури, розподіл тепла, що надходить в оброблювану деталь, стружку і технологічне середовище. В результаті з'являється можливість із єдиних теоретичних позицій в узагальненому вигляді кількісно оцінити та порівняти температуру різання при шліфуванні й лезовій обробці.

Вперше теоретично та експериментально обґрунтовано технологічні можливості суттєвого зниження максимальної температури різання та підвищення техніко-економічних показників механічної обробки на фінішних операціях шляхом переходу від шліфування до сучасних технологій високошвидкісного різання (точіння, розточування і фрезерування на сучасних високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" різальними твердосплавними і керамічними інструментами зі зносостійкими

покриттями).

Одержала подальший розвиток і поліпшення математична модель визначення параметрів силової напруженості при лезовій обробці (енергоємності та сили різання) із урахуванням уточнених значень умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Показано, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу переважає радіальна складова сили різання, яка і призводить до його значного зменшення (в 1,5 разів) порівняно із розрахунковими значеннями, отриманими на основі відомих залежностей.

Це дозволило обґрунтувати умови зниження енергоємності обробки і сили різання. Одержала подальший розвиток і поліпшення математична модель визначення пружних переміщень, що виникають в технологічній системі, та встановлено, що вони залежать, в першу чергу, від методу механічної обробки та його енергоємності. Тому основним шляхом підвищення точності та продуктивності обробки є застосування на фінішних операціях сучасних технологій високошвидкісної лезової обробки замість традиційних технологій шліфування та лезової обробки. На основі узагальнення аналітичного опису пружного переміщення при шліфуванні та лезовій обробці із урахуванням енергоємності проведено порівняння величин пружного переміщення для різних технологій механічної обробки, що дозволило вибрати найбільш ефективні варіанти високоточної та високопродуктивної фінішної обробки. Так, теоретично й експериментально обґрунтовано ефективність застосування технології високошвидкісного розточування отворів замість традиційної технології координатного внутрішнього шліфування із метою підвищення точності та продуктивності обробки. Це пов'язано, головним чином, із можливістю зменшення енергоємності обробки при високошвидкісному розточуванні отворів. В цьому випадку максимальна температура різання менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Тому з'являється можливість підвищення продуктивності обробки фактично без збільшення температури різання, оскільки вона незначно відрізняється від максимальної температури різання. При шліфуванні цього домогтися неможливо, оскільки

максимальна температура різання завжди більше температури плавлення оброблюваного матеріалу. На цій основі створено методологію розроблення та впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів лезової обробки із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Показано, що вони дозволяють до 10 разів і більше знизити енергоємність і підвищити продуктивність обробки при забезпеченні високих показників якості та точності оброблюваних поверхонь порівняно із шліфуванням. Це дозволило до 10 разів знизити трудомісткість обробки і до 200 разів розширити номенклатуру виробництва складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості в умовах дрібносерійного і штучного виробництва із забезпеченням її високої якості та конкурентоспроможності.

Розроблено методики розрахунку раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки, що дозволило визначити раціональні режими різання та характеристики різальних інструментів, які забезпечують значне підвищення продуктивності обробки для заданих значень температури та сили різання.

Розроблені технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості впроваджено в основне виробництво ТОВ "Імперія металів" із економічним ефектом 3,86 млн гривень, що дозволило забезпечити виготовлення високоякісної складнопрофільної формуючої оснастки для підприємств харчової промисловості Міністерства аграрної політики та продовольства України.

**Ключові слова:** технологічний процес, дрібносерійне та штучне виробництво, оброблювальний центр, фінішні операції, математична модель, температура різання, точність обробки, продуктивність обробки, енергоємність обробки, пружне переміщення.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

### Монографії

1. Полянський В. И. Обоснование условий повышения эффективности механической обработки. *Технологии производства: проблемы и решения*: монографія. Дніпро: ЛІРА, 2018. Розд. 8. С. 356–398.

2. Полянський В. И. Повышение качества и производительности обработки на основе снижения тепловой и силовой напряженностей процесса резания. *Современные технологии и техническое перевооружение предприятий*: монографія. Днепр: ЛІРА, 2018. Розд. 5. С. 267–340.

### Статті в наукометричній базі даних Scopus

3. Novikov F., Polyansky V., Shkurupiy V., Novikov D., Hutorov A., Ponomarenko Ye., Yermolenko O. O., Yermolenko O. A. Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering Technological Systems*. 2019. Vol. 6. No. 1(102). Pp. 41–50.

4. Fedir Novikov, Viktor Marchuk, Irina Marchuk, Valentin Shkurupiy and Vladimir Polyansky. Technological Support of Surface Layer for Optical Metalware. *Advances Manufacturing Processes II. InterPartner 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds.: V. Tonkonogyi (et al.), pp. 412–421, 2021.*

5. Fedir Novikov, Vladimir Polyansky, Igor Riabenkov, Andrii Hutorov and Oksana Yermolenko. Theoretical analysis of conditions for improving the gear grinding accuracy and productivity. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds.: V. Ivanov (et al.). Cham : Springer, 2020. Pp. 305–314.*

### Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

6. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Analytical determination of conditions for productivity improvement of diamond

grinding. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability* №1(19)/2017 Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu, ISSN 1844-640x. P. 280–286.

7. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Introduction to the analysis of the mechanics of the diamond grinding process with the account of wear of wheel grains. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability* №2/2017 Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu. P. 142–148.

8. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Mathematical model of high-performance diamond grinding / *Annals of "Constantin Brâncuși" University of Târgu Jiu. Engineering Series*, Issue 2/2018. Pp. 12-17.

9. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Conditions for energy capacity reducing of treatment at diamond grinding. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 2/2018 Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu, p. 13-18.

10. Feodor Novikov, Cătălin Iancu, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Determination of temperature during depth grinding and conditions for its decrease. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 1/ 2019 Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu, - pp. 5-10.

11. Полянский В. И. Концепции снижения температуры резания. *Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал*. № 3 (84). Беларусь, Минск, 2019. С. 28–29.

Статті в наукових фахових виданнях України

12. Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Дитиненко С. А., Полянский В. И. Экологически безопасные технологии шлифования и заточки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ "ХПІ", 2015. № 48 (1167). С. 29–33.

13. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке. *Вісник Національного*



технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ", 2016. № 33 (1205). С. 133–138.

14. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Андилахай А. А. Условия уменьшения температуры резания при точении. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць.* Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2016. Вип. 33. С. 87–92.

15. Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Дитиненко С. А., Полянский В. И. Экологические преимущества применения при шлифовании электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен электрохимической правки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Харків: НТУ "ХПІ", 2016. № 38 (1210). С. 35–40.

16. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні.* Харків: НТУ "ХПІ", 2017. № 17 (1239). С. 87–92.

17. Полянский В. И. Расширение технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий. *Перспективні технології та прилади: зб. наук. пр.* Луцьк: Луцький НТУ, 2017. №11 (2). С. 87–92.

18. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Дитиненко С. А., Крюк А. Г. Концепции высокоточной механической обработки деталей машин. *Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Харків: НТУ "ХПІ". 2017. № 43. С. 35–39.

19. Полянский В. И. Основные направления уменьшения шероховатости поверхности при фрезеровании. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр.* Краматорськ, 2017. Вип. № 40. С. 218–224.

20. Полянский В. И. Условия повышения эффективности высокоскоростного фрезерования на основе снижения энергоемкости

обработки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. пр. Краматорськ, 2017. Вип. № 41. С. 18–24.

21. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь. *Сучасні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. Харків: НТУ "ХП", 2018. Вип. 13. С. 51–59.

22. Полянский В. И. Оценка технологических возможностей различных схем механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХП". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки у матеріалів машинобудуванні та металургії*. 2018. № 23(1299). С. 57–61.

23. Полянский В. И. Математическая модель управления упругими перемещениями при механической обработке. *Вісник Національного технічного університету "ХП". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2018. № 27 (1303). С. 105–110.

24. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов. *Високі технології в машинобудуванні*: зб. наук, праць / під заг. ред. проф. О. М. Шелкового, редкол.: проф. І. М. Пижов (голова) та ін. Харків, НТУ "ХП", 2018. Вип. 1 (28). С. 120–130.

25. Полянский В. И. Теоретическое определение шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании. *Вісник НТУ "ХП". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ "ХП", 2018. № 30(1306). С. 58–62.

26. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при механической обработке и условия уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. *Вісник НТУ "ХП". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, 2018. № 31(1306). С. 72–76.

27. Полянский В. И. Повышение эффективности технологии механической обработки формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Вісник Національного технічного університету*

"ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2018. № 34 (1310). С. 29–33.

28. Новиков Ф. В., Гуцаленко Ю. Г., Полянский В. И., Ивкин В. В. Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен круга. *Резание и инструменты в технологических системах*: междунар. науч.-техн. сб. / редкол.: А. И. Грабченко (отв. ред.). Харьков: НТУ "ХПИ", 2018. Вып. 88. С. 142–157.

29. Полянский В. И. Определение максимально возможной производительности лезвийной обработки с учетом ограничения по температуре резания. *Резание и инструменты в технологических системах*: Междунар. науч.-техн. сб. / под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол.: проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. Харьков: НТУ "ХПИ", 2018. Вып. 89 (101). С. 141–148.

30. Полянский В. И. Эффективное применение современных технологий механической обработки. *Машинобудування*: зб. наук. пр. Харків: УПА, 2018. Вип. 22. С. 28–33.

31. Полянский В. И. Теоретический анализ параметров теплового процесса при шлифовании. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА, 2018. № 1 (43). С. 170–175.

32. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Андилахай А. А. Расчет и анализ параметров силовой напряженности процесса резания. *Наука та виробництво*: міжвуз. темат. зб. наук. пр. ДВНЗ "ПДТУ". Маріуполь, 2018. Вип. 19. С. 21–32.

33. Полянский В. И. Определение технологических возможностей механической обработки по температурному критерию. *Вісник Приазовського державного технічного університету*: зб. наук. праць. Маріуполь: ДВНЗ "ПДТУ", 2018. Вип. 36. С. 172–180.

34. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Аналитическое определение технологических параметров механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*: зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 8 (1333) 2019. С. 239–244.

35. Полянский В. И. Теоретическое обоснование условий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки деталей машин. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 11 (1336). С. 65–69.

36. Полянский В. И. Взаимосвязь параметров теплового процесса при глубинном шлифовании с качеством обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 19 (1344). С. 28–33.

37. Полянский В. И. Технологические закономерности снижения энергоемкости при механической обработке деталей машин. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*: зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 22 (1347). С. 95–100.

38. Полянский В. И. Теоретический анализ путей повышения качества и производительности механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 26 (1351). С. 42–46.

39. Полянский В. И. Сравнительный анализ температуры резания при шлифовании и точении и условия ее уменьшения. *Машинобудування*: зб. наук. пр. Харків: УПА, 2019. Вип. 24. С. 24–32.

40. Полянский В. И. Определение оптимальных условий операции зубошлифования на основе температурного критерия. *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. / ДВНЗ "ПДТУ". Маріуполь, ПДТУ, 2019. Вип. 2. С. 69–79.*

41. Полянский В. И. Технологические закономерности повышения точности и производительности обработки при шлифовании. *Наука та*

*виробництво*: міжвуз. темат. зб. наук. пр. / ДВНЗ "ПДТУ". Маріуполь, ПДТУ, 2019. Вип. 20. С. 91–103.

42. Полянський В. І. Закономірності формування і зниження температури різання при механічній обробці. *Вісник Приазовського державного технічного університету*: зб. наук. пр. Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2019. Вип. 39. С. 119–126.

43. Полянский В. И. Условия повышения эффективности прерывистого шлифования. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА, 2019. № 3 (47). С. 109–115.

44. Полянский В. И. Условия снижения силовой напряженности механической обработки. *Перспективні технології та прилади*: зб. наук. пр. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 14. С. 113–117.

45. Полянский В. И. Концепции высокоточной механической обработки отверстий в деталях машин. *Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 15. С. 68–74.

46. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Закономерности управления тепловыми процессами при механической обработке. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 1 (1) 2020. С. 13–18.

47. Полянский В. И. Повышение качества и производительности финишной абразивной и лезвийной обработки деталей машин. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 2 (1356). С. 84–88.

48. Новіков Ф. В., Полянський В. І. Визначення умов підвищення якості механічної обробки за температурним критерієм. *Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2020. Вип. 17. С. 99–106.

## Патенти України

49. Спосіб шліфування циліндричної деталі: пат. 140930 Україна. Ф. В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 09840, 16.09.2019, опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. 6 с.

50. Спосіб глибинного шліфування циліндричної деталі: пат. 141255 Україна. Ф. В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 10261, 09.10.2019, опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. 6 с.

51. Спосіб розсвердлювання отвору: пат. 141256 Україна. Ф.В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 10262, 09.10.2019, опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. 6 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

52. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 21–23 сентября 2016 г.). Одесса: ОНПУ, 2016. – С. 143–146.

53. Полянский В.И. Производство формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Фізичні та комп'ютерні технології*: матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 7–9 грудня 2016 р.). Дніпро: ЛІРА, 2016. С. 82–88.

54. Полянский В. И., Новиков Ф. В. Условия уменьшения максимальной температуры резания. *Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 17-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Свалява, 20–24 февраля 2017 г.). Киев: АТМ України, 2017. С. 236–239.

55. Полянский В. И. Разработка и изготовление высокоточной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*: материалы 17-й Междунар. научн.-практ. конф. (г. Одесса, 04–08 сентября 2017 г.). Киев: АТМ України, 2017. С. 140–143.

56. Полянский В. И. Уточненный расчет параметров силовой напряженности процесса резания. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 20–22 сентября 2017 г.). Одесса: ОНПУ, 2017. С. 110–113.

57. Полянский В. И. Повышение качества и производительности механической обработки. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 26–29 сентября 2018 г.). Одесса: ОНПУ, 2018. С. 152–155.

58. Полянский В.И. Технологическое обеспечение высокоскоростной механической обработки. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (31 жовтня – 02 листопада 2018 р.) / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 164–166.

59. Полянский В. И. Упрощенные расчеты температуры резания. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 19-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Кошице, 18–22 февраля 2019 г.). Киев: АТМ України, 2019. С. 163–167.

60. Полянский В. И. Эффективность применения технологии зубошлифования по методу профильного копирования. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса 16–18 мая 2019 г.). Одесса: ОНПУ, 2019. С. 142–145.

61. Полянский В. И. Применение прогрессивных технологий механической обработки в производстве высокоточных деталей машин. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 90-річ. заснування кафедри обробки металів тиском (м. Харків, 20–22 листопада 2019 р.). Харків: НТУ "ХПІ", 2019. С. 128–129.

62. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Коломиец В. В. Математическая модель определения температуры резания при лезвийной обработке.

*Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 20-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Тбилиси, 23–28 марта 2020 г.). Киев: АТМ України, 2020. С.123–127.

63. Полянский В. И. Закономерности формирования температуры резания при лезвийной обработке. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 23–25 сентября 2020 г.). Одесса: ОНПУ, 2020. С. 143–149.

64. Полянський В. І. Підвищення ефективності механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. *Високі технології: тенденції розвитку*: матеріали XXVIII міжнар. наук.-техн. семінару (м. Харків, 3–5 листопада 2020 р.). Харків: Вид-во НТУ "ХПІ" (онлайн), "Курсор" (друк), 2020. С. 124–127.



## ABSTRACT

*Polyansky V. I.* Basics of quality assurance and reduction of labor intensity of machining of complex-shaped forming equipment for the food industry. – On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering (13 – mechanical engineering). National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, 2021.

Dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and applied problem of the theoretical definition and substantiation of the conditions for a significant increase in quality, accuracy, productivity and a decrease in the labor intensity of machining by reducing its thermal and power tensions and, on this basis, the development of effective technological processes for machining of complex molding equipment for the food industry using modern high-speed CNC metal cutting machines of the "machining center" type and progressive cutting blade carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings. The scientific novelty of the results obtained is that for the first time theoretical approaches have been developed to determine the technological possibilities of improving the quality and reducing the labor intensity of machining by reducing its thermal and power tensions. Simplified mathematical models have been developed for determining the cutting temperature during grinding and blade processing, based on taking into account the balance of heat arising in the cutting zone and entering the surface layer of the workpiece, the resulting chips and coolant. For the first time, a generalization of theoretical solutions for determining the parameters of the thermal process during machining is carried out, taking into account the achievement of the final value of the depth of penetration of heat into the surface layer of the work piece. The main direction of reducing the cutting temperature, improving the quality and productivity of processing has been established, which consists of reducing the maximum cutting temperature to the level and below the melting temperature of the material being processed. This allows for a

significant increase in machining productivity to be achieved without actually increasing the cutting temperature. For the first time, a new universal technological parameter of machining was proposed – the maximum cutting temperature, upon reaching which all the heat generated during cutting goes to the chips, and which is determined by the ratio of the energy consumption of processing to the product of the specific heat and density of the processed material. This makes it possible to compare the maximum cutting temperature with the melting temperature of the processed material and, if exceeded, to apply the technological methods of its reduction for various machining technologies. It has been established that a decrease in the energy consumption of machining (engineering cutting stress) is the main condition for the reduction of the maximum cutting temperature and, accordingly, the cutting temperature. It is shown that the difference between the calculated and experimental values of the cutting temperature during grinding does not exceed 12%, which indicates the reliability of the developed mathematical model for determining the cutting temperature.

Calculations have established that in real grinding conditions, the ratio of the specified and maximum grinding temperatures can vary only within 0 ... 0.4 in connection with the excess of the maximum cutting temperature and the melting temperature of the processed material due to a significant increase of conventional cutting stress. This expands the technological opportunities of turning in comparison with grinding.

It was established for the first time that the most significant reduction in the cutting temperature during grinding can be achieved with intermittent grinding under conditions of equality of the lengths of the working protrusion and the cutout of the intermittent wheel, and under increase in the number of working protrusions of the wheel. In this case, the cutting temperature can be reduced by more than 2 times compared to the cutting temperature when grinding with a continuous wheel. However, the maximum cutting temperature in this case takes on values that are significantly higher than the melting temperature of the material being processed.

This limits the technological possibilities of interrupted grinding in comparison with edge cutting machining.

For the first time, the technological capabilities of determining the cutting temperature during blade processing using a mathematical model, which is based on the number of shearing elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone, have been expanded. It was found that with their increase, the cutting temperature can increase up to 10 times. This is possible when grinding in conditions of continuous contact of the bond of the grinding wheel with the processed material. During blade processing, the amount of shearing elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone is insignificant, which makes it possible to reduce the cutting temperature and increase the quality and productivity of processing.

It has been established that the mathematical models developed in this work for determining the cutting temperature during machining are positively different from the known models, because they analytically link all the main parameters of the thermal process during cutting: the cutting temperature, the maximum cutting temperature, the depth of heat penetration into the surface layer of the work piece, the temperature gradient, the distribution of heat entering the workpiece, chips and process medium. As a result, it becomes possible to quantify and compare the cutting temperature during grinding and blade processing from a unified theoretical positions in a generalized form.

For the first time, the technological capabilities of a significant reduction in the maximum cutting temperature and an increase in the technical and economic indicators of machining at finishing operations by moving from grinding to modern high-speed cutting technologies (turning, boring and milling on modern high-speed metal-cutting machines with CNC of "machining center" type using carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings) have been substantiated theoretically and experimentally.

The mathematical model for determining the parameters of force tension during blade processing (energy intensity and cutting force) has been further

developed and improved, taking into account the updated values of the conditional shear angle of the material being processed. It is shown that the radial component of the cutting force prevails in the formation of the conditional shear angle of the machined material, which leads to its significant decrease (by 1.5 times) in comparison with the calculated values obtained on the basis of known dependencies.

This made it possible to substantiate the conditions for reducing the energy consumption of processing and cutting force. The mathematical model for determining the elastic displacements arising in the technological system was further developed and improved, and it was found that they depend, first of all, on the method of machining and its energy intensity. Therefore, the main way to increase the accuracy and productivity of processing is the use of the modern technologies of high-speed blade processing in finishing operations instead of traditional technologies of grinding and blade processing. Based on the generalization of the analytical description of the elastic displacement during grinding and blade processing, and taking into account the energy intensity, in comparison with the elastic displacement values for various machining technologies was carried out, which made it possible to choose the most effective options for high-precision and high-performance finishing. Yes, it's theoretically and experimentally substantiated the effectiveness of using high-speed boring technology instead of the traditional technology of coordinate internal grinding in order to increase the accuracy and productivity of machining. This is mainly due to the possibility of reducing the energy intensity of machining during high-speed boring of holes. In this case, the maximum cutting temperature is lower than the melting temperature of the processed material. Therefore, it becomes possible to increase the machining productivity without actually increasing the cutting temperature, because it does not differ significantly from the maximum cutting temperature. This cannot be achieved with grinding, because the maximum cutting temperature is always higher than the melting temperature of the processed material. On this basis, a methodology was created for the development and implementation into production of effective technological processes for edge cutting machining using modern high-speed metal-cutting machines with CNC of

"machining center" type, and cutting blade carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings of foreign production. It is shown that they allow to reduce energy consumption up to 10 times or more and to increase processing productivity while ensuring high quality and accuracy of the processed surfaces in comparison with grinding. This made it possible to reduce the labor intensity of processing up to 10 times and to expand the range of production of molding tooling for the food industry up to 200 times in the conditions of small batch and unit production, ensuring its high quality and competitiveness.

The methods have been developed for calculating sustainable structures and parameters of technological processes for machining complex-shaped forming equipment, which made it possible to determine rational cutting modes and characteristics of cutting tools that provide a significant increase in machining productivity for given values of temperature and cutting force.

The technological processes have been developed and introduced into the main production of Empire of metals Ltd. with an economic effect of 3 860 000 UAH, for machining process of complex-shaped forming equipment for the food industry, which made it possible to ensure the manufacture of high-quality complex-shaped forming equipment for food industry enterprises of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine.

**Keywords:** technological process, small batch and unit production, machining center, finishing operations, mathematical model, cutting temperature, processing accuracy, process efficiency, process energy capacity, elastic displacement.

### **LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS ON THE THESIS TOPIC**

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

#### Monographs

1. Polyansky V.I. Justification of the conditions for increasing the efficiency of mechanical processing. *Production technologies: problems and solutions: monograph*. Dnipro: LYRA, 2018. Section. 8. Pp. 356–398.

2. Polyansky V.I. Improving the quality and productivity of processing on the basis of reducing the thermal and power tensions of the cutting process. *Modern technologies and technical re-equipment of enterprises*: monograph. Dnipro: LYRA, 2018. Section. 5. Pp. 267–340.

#### Articles in the scientometric database Scopus

3. Novikov F., Polyansky V., Shkurupiy V., Novikov D., Hutorov A., Ponomarenko Ye., Yermolenko O. O., Yermolenko O. A. Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering Technological Systems*. 2019. Vol. 6. No. 1(102). Pp. 41–50.

4. Fedir Novikov, Viktor Marchuk, Irina Marchuk, Valentin Shkurupiy and Vladimir Polyansky. Technological Support of Surface Layer for Optical Metalware. *Advances Manufacturing Processes II. InterPartner 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds.: V. Tonkonogyi (et al.). Pp. 412–421, 2021.

5. Fedir Novikov, Vladimir Polyansky, Igor Riabekov, Andrii Hutorov and Oksana Yermolenko. Theoretical analysis of conditions for improving the gear grinding accuracy and productivity. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds.: V. Ivanov (et al.). Cham: Springer, 2020. Pp. 305–314.

#### Articles in scientific periodicals of other states

6. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Analytical determination of conditions for productivity improvement of diamond grinding. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*. No 1 (19) / 2017. Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu. Pp. 280–286.

7. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Introduction to the analysis of the mechanics of the diamond grinding process with the account of wear of wheel grains. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*. No 2/2017 Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu. Pp. 142–148.

8. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Mathematical model of high-performance diamond grinding / *Annals of "Constantin Brâncuși" University of Târgu Jiu. Engineering Series*, Issue 2/2018. Pp. 12-17.

9. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Conditions for energy capacity reducing of treatment at diamond grinding. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*. No 2/2018 Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu. Pp. 13-18.

10. Feodor Novikov, Cătălin Iancu, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Determination of temperature during depth grinding and conditions for its decrease. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*. No 1/ 2019. Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu. Pp. 5-10.

11. Polyansky V.I. The concept of reducing the cutting temperature. *Mechanical engineer: Republican intersectoral industrial and practical journal*. No 3 (84). Belarus, Minsk, 2019. Pp. 28–29.

#### Articles in scientific professional publications of Ukraine

12. Novikov F.V., Novikov G.V., Ditinenko S.A., Polyansky V.I. Environmentally safe technologies for grinding and sharpening carbide tools with diamond wheels on metal bonds. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. No. 48 (1167). Pp. 29–33.

13. Novikov F.V., Polyansky V.I. Analytical determination of the cutting temperature during blade processing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. No. 33 (1205). Pp. 133–138.

14. Novikov F.V., Polyansky V.I., Andilayah A.A. Conditions for reducing the cutting temperature during turning. *Bulletin of the Azov State Technical University: Coll. Science. ave. SHEI "PDTU"*. Mariupol, 2016. No. 33. Pp. 87–92.

15. Novikov F.V., Novikov G.V., Ditinenko S.A., Polyanskiy V.I. Environmental Benefits of Using Metal Bonded Diamond Wheels for EDM Grinding

instead of Electrochemical Dressing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. No. 38 (1210). Pp. 35–40.

16. Novikov F.V., Polyansky V.I. Simplified calculation of the cutting temperature during grinding and blade processing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*. Collection of Scientific papers. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. No. 17 (1239). Pp. 87–92.

17. Polyansky V.I. Expansion of technological possibilities for increasing the accuracy of machining holes. *Perspective technologies and Devices*: Collected scientific papers. Lutsk: NTU, 2017. No. 11 (2). Pp. 87–92.

18. Novikov F.V., Polyansky V.I., Ditinenko S.A., Kryuk A.G. Concepts of high-precision machining of machine parts. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 43. C. 35–39.

19. Polyansky V.I. The main directions of reducing surface roughness during milling. *Reliability of the tool and optimization of technological system*. Collection of Science papers. Kramatorsk. No. 40, 2017. Pp. 218–224.

20. Polyansky V.I. Conditions for increasing the efficiency of high-speed milling based on reducing the energy consumption of processing. *Reliability of the tool and optimization of technological system*. Collection of Science papers. Kramatorsk. No. 41, 2017. Pp. 18–24.

21. Polyansky V.I. Calculation of the grinding temperature taking into account the balance of heat going into the chips and the workpiece. *Modern Technologies in Mechanical Engineering* : Collection of Scientific papers / editor-in-chief: V.O. Fedorovich (chairman) [etc.]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 13. Pp. 51–59.

22. Polyansky V.I. Evaluation of technological capabilities of various schemes of mechanical processing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical*



*engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 23 (1299). Pp. 57–61.

23. Polyansky V.I. Mathematical model of elastic displacement control during machining. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*: Collection of Scientific papers. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 27 (1303). Pp. 105–110.

24. Polyansky V.I. Mathematical model of the thermal process when grinding materials. High technologies in mechanical engineering: Printed scientific works / під заг. ed. prof. O. M. Shelkovy, editorial board: prof. I. M. Pizhov (head) is the in. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 1 (28). Pp. 120–130.

25. Polyansky V.I. Theoretical determination of surface roughness in high-speed milling and grinding. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 30 (1306). Pp. 58–62.

26. Polyanskiy V.I. Mathematical model of the thermal process during machining and the conditions for reducing the cutting temperature and increasing the productivity of machining. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*: Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 31(1306). Pp. 72–76.

27. Polyansky V.I. Increasing the efficiency of the technology of mechanical processing of forming tooling for pasta and confectionery industries. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*. Collection of Scientific papers. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 34 (1310). C. 29–33.

28. Novikov F.V., Gutsalenko Yu.G., Polyansky V.I., Ivkin V.V. Mechanics and productivity of diamond grinding taking into account the wear of wheel grains. *Cutting & Tools in Technological Systems*: International Scientific-Technical

Collection / editorial board: A.I. Grabchenko (editor-in-chief). Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 88. Pp. 142–157.

29. Polyansky V.I. Determination of the maximum possible productivity of blade processing, taking into account the limitation on the cutting temperature. *Cutting & Tools in Technological Systems*. International Scientific-Technical Collection / under total. ed. prof. A. N. Shelkovy, editorial board: prof. A.I. Grabchenko (editor-in-chief) and others. Kharkiv NTU "KhPI", 2018. Edition 89 (101). Pp. 141–148.

30. Polyansky V.I. Effective use of modern technologies of mechanical processing. *Engineering: collection of scientific works*. Kharkiv: UEPA, 2018. No. 22. Pp. 28–33.

31. Polyansky V.I. Theoretical analysis of the parameters of the thermal process during grinding. *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy: Coll. science. etc. - Kramatorsk*, 2018. No. 1 (43). Pp. 170–175.

32. Novikov F.V., Polyansky V.I., Andilahay A.A. Calculation and analysis of parameters of force tension of the cutting process. *Science and Production - innovation: interuniversity thematic collection of scientific works / SHEI "PDTU"*. Mariupol, 2018. No. 19. Pp. 21–32.

33. Polyansky V.I. Determination of technological capabilities of mechanical processing by temperature criterion. *Reporter of the Priazovskyi State Technical university*. Collection of Science works. Mariupol. 2018. Issue. 36. S. 172–180.

34. Novikov F.V., Polyansky V.I. Analytical determination of technological parameters of machining. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies: Collection of Scientific papers*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No. 8 (1333) 2019. Pp. 239–244.

35. Polyansky V.I. Theoretical substantiation of conditions for high-precision and high-performance machining of machine parts. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No. 11 (1336). Pp. 65–69.

36. Polyansky V.I. The relationship between the parameters of the thermal process during deep grinding with the quality of processing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*: Collection of Scientific papers. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No. 19 (1344). Pp. 28–33.

37. Polyansky V.I. Technological patterns of reducing energy consumption during machining of machine parts. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*: Collection of Scientific papers. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No. 22 (1347). Pp. 95–100.

38. Polyansky V.I. Theoretical analysis of ways to improve the quality and productivity of machining. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No. 26 (1351). Pp. 42–46.

39. Polyansky V. I. A comparative analysis of the cutting temperature during grinding and turning and the conditions for its reduction. *Engineering* : collection of scientific works. Kharkiv: UEPA, 2019. No. 24. Pp. 24–32.

40. Polyansky V.I. Determination of optimal conditions for gear grinding operation based on temperature criterion. *Science and Production - innovation*: interuniversity thematic collection of scientific works. SHEI "PDTU". Mariupol, 2019. No. 2. Pp. 69–79.

41. Polyanskiy V. I. Technological laws to improve the accuracy and productivity of processing during grinding. *Science and Production - innovation*: interuniversity thematic collection of scientific works. SHEI "PDTU". Mariupol, PDTU, 2019. No. 20. Pp. 91–103.

42. Polyansky V.I. Patterns of formation and reduction of cutting temperature during machining. *Bulletin of the Azov State Technical University*: Coll. Science. ave. SHEI "PDTU". Mariupol, 2019. No. 39. Pp. 119–126.

43. Polyansky V.I. Conditions for increasing the efficiency of intermittent grinding. *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*: Coll. Science. etc. Kramatorsk, 2019. No. 3 (47). Pp. 109–115.

44. Polyansky V.I. Conditions for reducing the force intensity of machining. *Perspective technologies and Devices: Collected scientific papers*. Lutsk: NTU, 2019. No. 14. Pp. 113–117.

45. Polyansky V.I. Concept of high-precision machining of holes in machine parts. *Perspective technologies and Devices: collected scientific papers*. Lutsk: NTU, 2019. No. 15. Pp. 68–74.

46. Novikov F.V., Polyansky V.I. Regularities of control of thermal processes during machining. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. No. 1 (1) 2020. Pp. 13–18.

47. Polyansky V.I. Improving the quality and productivity of finishing abrasive and blade processing of machine parts. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy*. Collected Works. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. No. 2 (1356). Pp. 84–88.

48. Novikov F.V., Polyansky V.I. Determination of conditions for improving the quality of machining by temperature criterion. *Perspective technologies and Devices: Collected scientific papers*. Lutsk: NTU, 2020. No. 17. Pp. 99–106.

#### Patents of Ukraine

49. The method of grinding a cylindrical part: US Pat. 140930 Україна. F.V. Novikov, M.F. Smirny, V.I. Polyansky, I.O. Ryabekov, D.F. Novikov. Declared. u 2019 09840, 16.09.2019, publ. 10.03.2020, bulletin. No 5. 6 s.

50. Method of clay grinding of cylindrical parts: US Pat. 141255 Ukraine. F.V. Novikov, M.F. Smirniy, V.I. Polyansky, I.O. Ryabekov, D.F. Novikov. Declared. u 2019 10261, 09.10.2019, publ. 25.03.2020, bulletin. No 6. 6 s.

51. The method of drilling a hole: US Pat. 141256 Ukraine. F.V. Novikov, M.F. Smirny, V.I. Polyansky, I.O. Ryabekov, D.F. Novikov. Declared. u 2019 10262, 09.10.2019, publ. 25.03.2020, bulletin. No 6. 6 s.

Scientific works that certifying the approbation of the dissertation materials:

52. Novikov F.V., Polyansky V.I. Simplified calculation of cutting temperature during grinding. *New and unconventional technologies in resource and energy*

*saving*: materials of the international. scientific and technical conf. (Odessa, September 21-23, 2016). Odessa: ONPU, 2016. Pp. 143–146.

53. Polyansky V.I. Production of molding tools for the pasta and confectionery industries. *Physical and computer technologies*: materials of the XXII International. scientific-practical conf. (Kharkiv, December 7-9, 2016). Dnipro: LIRA, 2016. S. 82–88.

54. Polyansky V.I., Novikov F.V. Conditions for reducing the maximum cutting temperature. *Modern problems of production and repair in industry and transport*: materials of the 17th Intern. scientific and technical seminar (Svalyava, February 20-24, 2017). Kiev: ATMU, 2017. Pp. 236–239.

55. Polyansky V.I. Development and manufacture of high-precision molding tooling for pasta and confectionery industries. *Quality, standardization, control: theory and practice*: materials of the 17th Intern. scientific-practical conf. (Odessa, 04-08 September 2017). Kiev: ATMU, 2017. S. 140–143.

56. Polyanskiy V.I. Refined calculation of the parameters of the force intensity of the cutting process. *New and unconventional technologies in resource and energy saving*: materials of the international. scientific and technical conf. (Odessa, September 20-22, 2017). Odessa: ONPU, 2017. Pp. 110–113.

57. Polyansky V.I. Increase in the quality and productivity of machining. *New and unconventional technologies in resource and energy saving*: materials of the international. scientific and technical conf. (Odessa, September 26–29, 2018). Odessa: ONPU, 2018. Pp. 152–155.

58. Polyansky V.I. Technological support for high-speed machining. *Mechanical engineering through the eyes of young people: progressive ideas - science - production*: materials intern. scientific-practical conf. (October 31 - November 02, 2018) / Under the general. ed. V.D. Kovalev. Kramatorsk: DSEA, 2018. S. 164–166.

59. Polyansky V.I. Simplified calculations of cutting temperature. *Modern issues of production and repair in industry and transport*: materials of the 19th Intern. scientific and technical seminar (Kosice, February 18-22, 2019). Kiev: ATMU, 2019. Pp.163–167.

60. Polyansky V.I. Effectiveness of application of gear grinding technology by the method of profile copying. *New and unconventional technologies in resource and energy saving*: materials of the international. scientific and technical conf. (Odessa, May 16-18, 2019). Odessa: ONPU, 2019. Pp. 142–145.

61. Polyansky V.I. Application of progressive technologies of mechanical processing in the production of high-precision machine parts. *Resource saving and energy efficiency of processes and equipment for pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy*: materials XI International. scientific and technical conf., dedicated. 90th anniversary. establishment of the department of metal forming (Kharkiv, November 20-22, 2019). Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. S. 128–129.

62. Novikov F.V., Polyansky V.I., Kolomiets V.V. Mathematical model for determining the cutting temperature during blade processing. *Modern issues of production and repair in industry and transport*: materials of the 20th Intern. scientific and technical seminar (Tbilisi, March 23-28, 2020). Kiev: ATMU, 2020. Pp.123–127.

63. Polyansky V.I. Regularities of the formation of cutting temperature during blade processing. *New and unconventional technologies in resource and energy saving*: materials of the international. scientific and technical conf. (Odessa, September 23–25, 2020). Odessa: ONPU, 2020. Pp. 143–149.

64. Polyansky V.I. Improving the efficiency of machining of complex forming equipment for the food industry. *High technologies: development trends*: materials of the XXVIII International. scientific and technical seminar (Kharkiv, November 3-5, 2020). Kharkiv: NTU "KhPI" Publishing House (online), "Cursor" (print), 2020. Pp. 124–127.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6	
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАЙБІЛЬШ СУТТЄВИХ ПРОБЛЕМ</b>		
<b>ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОЯКІСНОЇ</b>		
<b>МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНОЇ ФОРМУЮЧОЇ</b>		
<b>ОСНАСТКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ .....</b>		15
1.1 Аналіз основних видів складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості та діючих технологій її механічної обробки	15	
1.2 Ефективність застосування сучасних технологій механічної обробки для підвищення якості та зниження трудомісткості .....	20	
1.3 Аналіз відомих теоретичних підходів до визначення умов зниження температури різання та підвищення якості механічної обробки .....	33	
1.4 Аналіз теоретичних підходів до визначення умов зниження енергоємності обробки та сили різання .....	49	
1.5 Аналіз відомих теоретичних підходів до визначення умов підвищення точності обробки .....	56	
1.6 Наукові передумови підвищення ефективності механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості	61	
1.7 Мета та задачі досліджень .....	64	
Висновки по розділу 1 .....	65	
<b>РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ І ЗАГАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ</b>		
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>		69
2.1 Обґрунтування напрямку дослідження .....	69	
2.2 Загальна методика досліджень .....	74	
Висновки по розділу 2 .....	81	
<b>РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ</b>		
<b>УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ</b>		
<b>ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ НА ОСНОВІ ЗНИЖЕННЯ</b>		
<b>ТЕПЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ .....</b>		83

3.1 Теоретичний підхід до розрахунку температури різання при шліфуванні .....	83
3.2 Розрахунок температури шліфування з урахуванням балансу тепла, що надходить в стружки, що утворюються, та оброблювану деталь .....	96
3.3 Теоретичний аналіз параметрів теплового процесу при шліфуванні .	117
3.4 Експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень .....	127
3.5 Узагальнений аналіз шляхів зменшення температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки при механічній обробці .....	134
Висновки по розділу 3 .....	141
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ МЕТОДІВ ШЛІФУВАННЯ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМ КРИТЕРІЄМ .....</b>	
4.1. Теоретичний аналіз параметрів теплового процесу при глибинному шліфуванні .....	145
4.2 Визначення оптимальних значень параметрів операції зубошліфування за методом профільного копіювання на основі температурного критерію .....	151
4.3 Умови підвищення ефективності застосування переривчастого шліфування .....	160
4.4 Порівняння енергоємності обробки та максимальної температури різання при шліфуванні та лезовій обробці .....	169
Висновки по розділу 4 .....	175
<b>РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ОСНОВІ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ТА СИЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ .....</b>	
5.1. Два підходи до визначення температури різання при лезовій обробці .....	179



5.2. Теоретичний підхід до визначення температури різання при лезовій обробці з періодичним в часі переміщенням теплового джерела вздовж адіабатичного стержня .....	186
5.3. Спрощений підхід до визначення температури різання при лезовій обробці .....	196
5.4. Уточнений розрахунок параметрів теплового процесу при механічній обробці та умови зменшення температури різання й підвищення продуктивності обробки .....	202
Висновки по розділу 5 .....	209
<b>РОЗДІЛ 6 ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ЗМЕНШЕННЯ СИЛОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ .....</b>	<b>212</b>
6.1. Теоретичний аналіз взаємозв'язків параметрів силової та теплової напруженостей механічної обробки .....	212
6.2. Спрощений підхід до розрахунку складових сили різання при точінні .....	217
6.3. Уточнений підхід до розрахунку складових сили різання та параметрів силової напруженості при точінні .....	224
6.4. Умови підвищення ефективності високошвидкісного фрезування на основі зниження енергоємності обробки .....	235
Висновки по розділу 6 .....	242
<b>РОЗДІЛ 7 ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ Й ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ .....</b>	<b>245</b>
7.1. Теоретичний аналіз формування пружних переміщень, що виникають в технологічній системі при шліфуванні .....	245
7.2 Математична модель управління пружними переміщеннями при механічній обробці .....	256
7.3. Концепції високоточної механічної обробки отворів в деталях машин .....	265
Висновки по розділу 7 .....	273

РОЗДІЛ 8 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНОЇ ФОРМУЮЧОЇ ОСНАСТКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ .....	276
8.1. Експериментальне оцінювання умов зменшення енергоємності, температури різання та підвищення продуктивності й якості механічної обробки .....	276
8.2. Експериментальні дослідження та розроблення прогресивних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формууючої оснастки для харчової промисловості .....	286
Висновки до розділу 8 .....	305
ВИСНОВКИ .....	307
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	312
ДОДАТКИ .....	343
ДОДАТОК А. Відомості про апробацію дисертаційної роботи .....	344
ДОДАТОК Б. Список опублікованих праць за темою дисертації .....	347
ДОДАТОК В. Оцінювання технологічних можливостей різних схем механічної обробки за температурним критерієм .....	359