

ЛЕТЮК В. І., КЛОЧКО О. О., ШЕЛКОВИЙ О. М., ФЕДОРЕНКО В. С.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ГРУПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «РОБОЧА ЛОПАТКА» ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

У роботі проведено комплексний аналіз проблеми формування групової технології обробки деталей типу "лопатка парової турбіни". З метою дослідження виконано літературний огляд наукових праць за тематикою організації виробництва та технології виготовлення лопаток парових турбін. Особливу увагу приділено сучасним тенденціям розвитку групової механічної обробки деталей зі складним профілем. Розглянуто можливість типізації лопаток парових турбін за різними характеристиками: призначенням, матеріалами, геометрією їх конструктивних елементів (хвосту, робочі частини, головки). На основі аналізу сформульовані організаційно-технічні й технологічні вимоги виробництва робочих лопаток парових турбін, виконано технічний та організаційно-технологічний аналіз механообробного виробництва робочих лопаток 4, 5 ступенів турбіни потужністю 1000 МВт. Виявлені організаційно-технологічні переваги та недоліки існуючого виробництва лопаток парових турбін. До переваг можна віднести накопичений досвід та відпрацьовані технології, тоді як недоліками є недостатня автоматизація та гнучкість, широка номенклатура деталей, велика трудомісткість їх виготовлення та значна кількість виконуваних операцій. Науково-технічний та організаційно-технологічний аналіз виробництва дозволив сформулювати цілі та задачі дослідження і передумови для створення групового автоматизованого механообробного виробництва лопаток парових турбін потужністю 1000 МВт.

Ключові слова: робоча лопатка парової турбіни, технологічна підготовка виробництва, механічна обробка, групова технологія обробки, виробничий процес, імітаційне моделювання.

LETIUK V., KLOCHKO O., SHELKOVYI O., FEDORENKO V.

ANALYSIS OF THE PROBLEM OF FORMING A GROUP TECHNOLOGY OF MACHINING STEAM TURBINE BLADE-TYPE PARTS

The paper presents a comprehensive analysis of the problem of forming a group technology for machining parts of the "steam turbine blade" type. For the purpose of the study, a literature review of scientific works on the organization of production and the technology of manufacturing steam turbine blades was carried out. Particular attention is paid to modern trends in the development of group machining of parts with complex profiles. The possibility of typifying steam turbine blades according to various characteristics is considered: purpose, materials, geometry of their structural elements (roots, working sections, shrouds). Based on the analysis, organizational, technical, and technological requirements for the production of steam turbine blades were formulated, and a technical and organizational-technological analysis of the machining production of blades of the 4th and 5th stages of a 1000 MW turbine was performed. Organizational and technological advantages and disadvantages of the existing production of steam turbine blades were identified. The advantages include accumulated experience and well-developed technologies, while the disadvantages are insufficient automation and flexibility, a wide range of parts, high labor intensity of their manufacture, and a significant number of operations performed. The scientific, technical, and organizational-technological analysis of production made it possible to formulate the goals and objectives of the study and the prerequisites for creating a group automated machining production of steam turbine blades with a capacity of 1000 MW.

Keywords: steam turbine blade, technological preparation of production, machining, group technology of machining, production process, simulation modeling.

Вступ. Робочі та направляючі лопатки є ключовими елементами парових турбін, адже саме вони формують проточну частину, де відбувається перетворення теплової енергії робочого середовища у механічну роботу обертання ротора. Лопаточний апарат є найдорожчою і найвідповідальнішою частиною турбіни, а його якість визначає ККД, економічність та надійність установки. Умови роботи лопаток надзвичайно складні: вони зазнають дії значних центробіжних сил, пульсуючого потоку пари чи газу, що викликає вібрації та резонансні коливання. Додатково впливають високі температури, корозія та ерозія від частинок води. Це вимагає ретельного конструювання, вибору матеріалів і точності виготовлення. Сучасна парова турбіна має складний лопаточний апарат, що включає велику номенклатуру робочих і направляючих лопаток. Загальна кількість лопаток в складі однієї турбіни може сягати кількох тисяч. Лопатки мають складну просторову форму, водночас значна частина з них уніфікована, що створює передумови для застосування групових технологій. Однак різні типи лопаток мають відмінності у геометрії, що ускладнює використання єдиних технологічних маршрутів. Тож, важливим є удосконалення процесу функціонування серійного виробництва лопаток парових турбін шляхом зниження виробничих витрат при забезпеченні заданої якості та дотриманні календарного плану випуску.

Аналіз основних досягнень та літератури. Парові турбіни виготовляються переважно малим обсягом випуску (кількість виробів певних найменувань, типорозміру і виконання, які виготовляються протягом планованого інтервалу часу) що визначає одиничний тип виробництва. Така ситуація зумовлена високою складністю конструкції, значною вартістю та тривалим циклом виробництва, який для великих турбін може сягати року. Водночас у складі турбіни є елементи, що виготовляються у значно більшій кількості. Це насамперед лопатки. Їхня загальна кількість у турбіні може сягати кілька тисяч. Така масовість впливає на характер виробництва: якщо сама турбіна є одиничним виробом, то її лопатки виготовляються за принципом серійного виробництва. Значна кількість лопаток створює умови для застосування методів серійної організації виробництва: уніфікації технологічних процесів, поєднання деталей у групи за спільними ознаками, використання спеціалізованих верстатів та впровадження автоматизації та потоковості. Але попри велику загальну кількість ми стикаємося з проблемою значної номенклатури лопаток: кожна турбіна включає десятки різновидів лопаток, що відрізняються за призначенням, розмірами, профілем робочої частини, типом і профілем хвостової частини, тощо, що потребує гнучкості і індивідуального підходу при виробництві.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є удосконалення серійного виробництва робочих лопаток парових турбін шляхом зменшення виробничих витрат і підвищення ефективності отримання виробів заданої якості згідно з календарним планом випуску методами імітаційного моделювання.

Для цього сформульовано завдання:

1. на основі аналізу організаційно-технічних й технологічних вимог до виробництва лопаток турбін, а також сучасних джерел інформації і світових тенденцій, які намітилися в останні роки в цій області, сформулювати проблему формування технології обробки деталей типу "Робоча лопатка парової турбіни" в умовах серійного автоматизованого виробництва;

2. виявити організаційно-технологічні переваги та недоліки існуючого виробництва робочих лопаток і на цій основі сформулювати цілі та задачі дослідження ;

3. навести загальну методику проведення досліджень;

4. сформулювати завдання розробки імітаційної моделі функціонування системи групового механоскладального виробництва робочих лопаток, до якого входять:

- завдання розробки моделі технологічної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання розробки моделі технічної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання розробки моделі організаційної структури системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

- завдання моделювання процесу функціонування системи групового механообробного виробництва до і після модернізації;

5. сформулювати основні теоретичні положення імітаційної моделі функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток, а саме:

- розробити та виконати опис загальної структурної моделі системи групового механообробного виробництва;

- розробити та виконати опис моделі групового технологічного процесу механоскладального виробництва робочих лопаток парових турбін;

- розробити імітаційну модель організаційно-технічної структури системи групового механоскладального виробництва робочих лопаток парових турбін та виконати її опис;

6. розробити та виконати опис методики розробки імітаційних моделей функціонування систем групового механообробного виробництва робочих лопаток, до яких входять:

- методика опису загальної структурної моделі системи групового механообробного виробництва;

- методика генерації групових технологічних процесів обробки металів різанням робочих лопаток парових турбін;

- методика генерації імітаційних моделей функціонування систем групового механоскладального виробництва за заданими параметрами об'єкту обробки та характеристиками ефективності системи обробки;

7. розробити та виконати опис методики аналізу імітаційних моделей функціонування системи групового механоскладального виробництва, який складається з:

- методики оцінки адекватності імітаційної моделі функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток;

- методики порівняльного аналізу імітаційних моделей функціонування системи групового механообробного виробництва робочих лопаток парових турбін в умовах існуючого і модернізованого виробництва;

8. навести результати впровадження рекомендацій що до модернізації механообробного виробництва робочих лопаток на засадах імітаційного моделювання, для чого:

- сформулювати в термінах імітаційного моделювання задачу підвищення ефективності систем механообробного виробництва робочих лопаток;

- виконати порівняльний аналіз імітаційних моделей функціонування існуючої системи групового механообробного виробництва робочих лопаток з його автоматизованим виробництвом;

- за результатами порівняльного аналізу існуючого та автоматизованого виробництв робочих лопаток парових турбін виконати розрахунок техніко-економічної ефективності рекомендацій що до впровадження засобів автоматизації і механізації виробництва.

Матеріали дослідження. Лопатка - це найдорожча і найважливіша частина турбіни. Ефективність турбіни, насамперед, залежить від якості конструкції лопаток: трудомісткість виробництва лопаток сучасної потужної парової турбіни сягає 42-45% від загальної трудомісткості виробництва всіх її деталей. За офіційним призначенням лопатки є основними частинами парових турбін як лопаткові двигуни. Вони утворюють проточну частину турбіни, у якій тепла енергія робочого середовища (пара, газ) перетворюється на механічну роботу обертання ротора. Залежно від призначення лопатки поділяються на робочі та направляючі. Робочі лопатки (рухомі) встановлюються на роторі, а направляючі лопатки (фіксовані) - у діафрагмах статора. Комбінація направляючих і робочих лопаток називається лопатковим апаратом турбіни.

Залежно від умов роботи турбіни, довжина її робочих лопаток може варіюватися від кількох десятків до півтора тисяч міліметрів. На роторі лопатки розташовані поетапно, з поступовим збільшенням довжини та зміною форми поверхні.

При рівномірному потоці тиск на вході турбіни максимальний, а витрата мінімальна. Коли робоча рідина проходить через лопатки турбіни, виконується механічна робота, тиск знижується, але об'єм збільшується. Відповідно, площа поверхні лопаток і, відповідно, їх розмір збільшується. Наприклад, довжина лопатки першої ступені парової турбіни потужністю 300 МВт становить 97 мм, останньої - 960 мм.



Рис. 1 – Ротор турбіни потужністю 300МВт.

Конструкція найпростішої робочої лопатки складається з профільної робочої частини і хвостовика. Хвостовики використовуються для кріплення лопаток на диску. На кінці робочої частини виготовляється шип або бандаж. В першому випадку на групу лопаток накладають пластирну стрічку, у якій роблять отвори з нахилом і формою, що відповідають шипам на лопатках, встановлених на диску. Шипи кріпляться, і в результаті лопатки диска з'єднуються в пакети, що підвищує вібраційну надійність і дозволяє периферійно ущільнювати ступінь.

Короткі лопатки часто виготовляються з постійним профілем по висоті, довгі - з змінним профілем. Довгі лопатки мають бути скручені відповідно до трикутників швидкості на різній висоті. Водночас необхідно зменшити їхню площу від кореневого зрізу до периферії, щоб зменшити відцентрову силу робочої частини лопатки та напругу в кореневій зоні та в хвості.



Рис. 2 – Приклад набору робочих лопаток ротору турбіни з «молоточковим» та «виделковим» типом хвостовика

Конструкція робочої частини лопаток залежить від їх довжини, або, точніше, від співвідношення середнього діаметра ступеня до його довжини d_{cp}/l . При $d_{cp}/l > 10-15$ лопатки зазвичай виготовляються з постійним профілем робочої частини.

При $d_{cp}/l < 10$ профільна частина має скручену форму, змінний переріз, зазвичай плавно тоншає від кореня до периферії. Для останніх ступенів лопаток високопотужних парових турбін співвідношення площ кореневої секції до периферії досягає 7-10, а скручування профілю (різниця кутів монтажу периферійної та кореневої секцій) становить 65-70°. Розробка та виробництво таких лопаток створює великі труднощі. Тому на основі створеної лопатки максимальної довжини будується серія турбін різної потужності та призначення.

Великі лопатки виготовляються разом із проміжними корпусами та з профільними або плоскими поверхнями інтерфейсу.

Кріплення робочих лопаток у роторі здійснюється різними способами, що залежать від типу хвостової частини.



Рис.3 – Приклад набору лопаток парової турбіни з різними типами хвостовиків

Лопатки турбіни працюють у дуже складних умовах. Вони піддаються сильній відцентровій силі, згину та пульсуючим ефектам робочого середовища, викликаючи вібрації лопаток, при яких легко виникають резонансні коливання. Усе це відбувається при високих температурах робочого середовища, що впливає на лопатки як хімічно, так і механічно. На останніх ступенях відбувається ерозія кромки паровпуску частинками води, що містяться у вологій парі.

Ці умови вимагають особливо ретельного підходу до конструкції робочої частини, вибору матеріалів для лопаток та організації виробництва.

Особливо ретельно слід виконувати всі розміри, що формують форму робочої частини лопаток, і відповідати технічним вимогам, встановленим для їх виготовлення. Відхилення від креслень можуть спричинити додаткові напруження на лопатках, які не передбачені розрахунками, що, у свою чергу, може призвести до серйозної аварії турбіни.

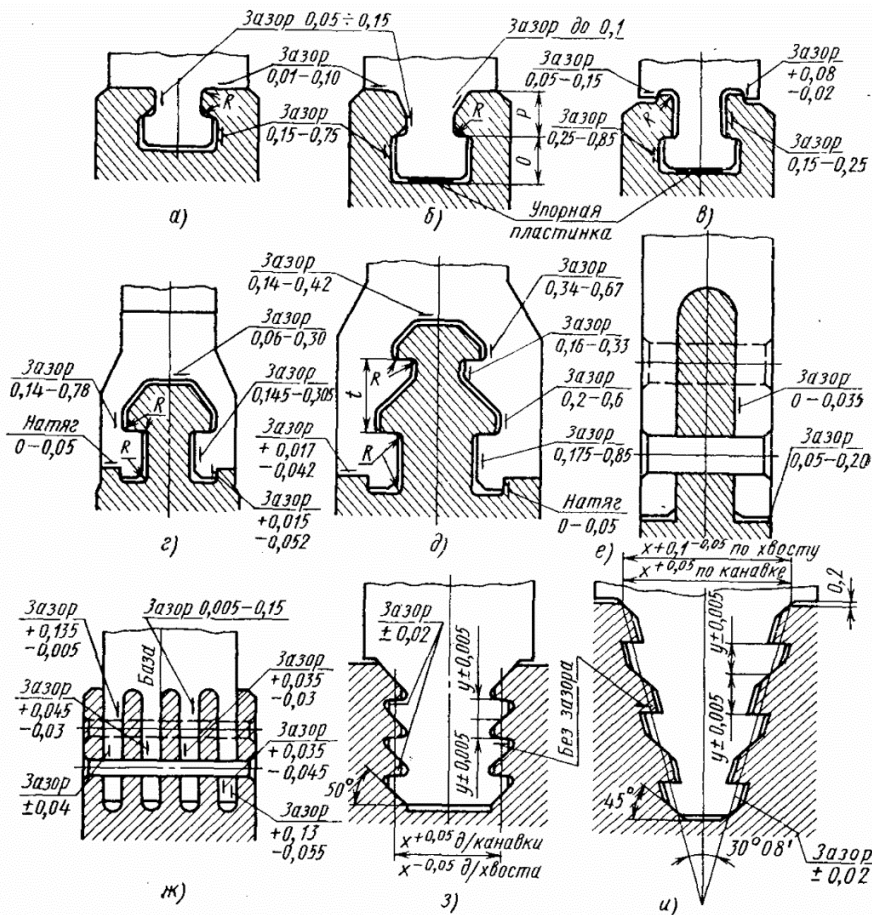


Рис.4 – Технічні вимоги до хвостових з'єднань лопаток з диском ротора

У виробника для кожного комплекту робочих лопаток видається внутрішній паспорт. У наборі лопатки пронумеровані. Форма паспорта (сертифікат якості) розробляється виробником. У паспорті набору вноситься така інформація: сертифікат матеріалу лопаток і комплектуючих; нумерація лопаток у технологічному процесі; результати контролю у виробничому процесі, що містять інформацію про відхилення від креслення (за їх наявності) та координаті цих відхилень з конструкторською службою виробника лопаток; висновок щодо відповідності власних частот коливання нормативним; висновок Відділу контролю якості щодо відповідності лопаток вимогам креслень; процедура розміщення лопаток на колесі відповідно до результатів зважування на моментних вагах (якщо це передбачено вимогами креслення).

Робочий креслення лопаток містять вимоги до матеріалу, геометричні розміри, допуски та граничні відхилення (базові поверхні для виконання та контролю геометричних розмірів); вимоги до шорсткості поверхонь; вимоги до загартування та покриттів (при наявності); креслення профілів робочої частини та хвостовика; вказівка контрольних перетинів; вимоги до зварювальних робіт; вимоги до контролів (неруйнівних методів, геометрії, вібрації тощо).

Матеріал для лопаток парових турбін має забезпечувати високу термостійкість і міцність при високих температурах, пластичність для рівномірного розподілу напружень, витривалість, стабільність властивостей у роботі, стійкість до корозії, окиснення та ерозії, а також добрі технологічні характеристики (кування, штампування, зварюваність). Для виготовлення лопаток використовують спеціальні нержавіючі сталі з 3,5–14% Ni та 12,5–16% Cr (12X13-Ш, 20X13-Ш, 15X11МФ-Ш, 18X11МНФБ-Ш, 13X11Н2В2МФ-Ш, 20X12ВНМФ-Ш), сталі обмеженого застосування (12X13, 13X11Н2В2МФ-Ш, 15X12ВНМФ-Ш, а також титанові сплави за погодженням із виробником. Титанові сплави використовуються для останніх ступенів роторів низького тиску, так як вони відзначаються більшою легкістю, високою корозійною стійкістю, кращою ерозійною стійкістю порівняно з нержавіючими сталями (але нижчою за сталі), проте їх виготовлення й обробка значно складніші та потребують спеціальних інструментів та режимів обробки.

Організаційно-технічні умови виробництва передбачають чітку послідовність технологічних операцій виготовлення лопаток із використанням спеціальних машин, інструментів та вимірювальних пристроїв. Нові лопатки повинні відповідати кресленням й не мати дефектів. Важливим параметром є шорсткість полірованої поверхні робочої частини, що впливає на втрати пари та антикорозійну стійкість.

Розміри лопаток поділяють на три групи: посадкові (найвідповідальніші, як правило до них відносяться розміри хвостової частини), розміри з підвищеною точністю (координати каналів, перерізи, отвори, допуски

$\pm 0,1-0,5$ мм), та вільні (жолобники, фаски). Найбільш відповідальними є хвостові з'єднання, для яких допуски зазорів не перевищують 0,02–0,03 мм. Їх обробляють профільними фрезами, карусельним точінням або кінцевими та дисковими фрезами залежно від типу хвоста, що забезпечує точність і надійність кріплення лопаток у турбіні.

Етапи підготовки виробництва лопаток парових турбін охоплюють розроблення робочих креслень, технологічних процесів та спеціального оснащення. Конструктори створюють креслення деталей і заготовок, технологи здійснюють контроль їх технологічності та погоджують технічні вимоги й допуски на обробку. Далі розробляється технологічний процес, що визначає послідовність операцій, режими різання, використання обладнання та інструментів. Важливим є забезпечення технологічності конструкції, оцінка трудомісткості виробництва, можливості застосування нових матеріалів і сучасних методів обробки.

Для виготовлення лопаток застосовують заготовки, отримані методами гарячого штампування, прокатування та лиття, що дозволяє зменшити трудомісткість виготовлення та відходи матеріалу. Технологічна підготовка включає виготовлення моделей, ковок, відливок, замовлення напівфабрикатів і створення інструкційних карт для кожної операції. Ефективність процесу підвищується завдяки типізації та групуванню.

Головною метою класифікації та типізації лопаток є наступна типізація технологічних процесів і на цій основі вдосконалення технологічності конструкцій та технології виробництва лопаток.

Аналіз креслень та технологічних процесів механічної обробки лопаток дозволяє встановити такі основні положення:

1. Незважаючи на існуючу різноманітність конструкцій, робочі та направляючі лопатки парових турбін можуть бути приведені до кількох основних типів. Багато конструкції основних елементів лопаток (хвостів, робочих частин, головок) також є типовими і зустрічаються в різних поєднаннях в різних конструкціях лопаток.
2. Кожному типу лопаток відповідає цілком певний технологічний процес обробки (особливо щодо операцій підготовки основних технологічних баз), відмінний від технологічних процесів обробки лопаток інших типів.
3. Кожному типу конструктивних елементів лопаток (хвостам, робочим частинам, головкам) властиві певний склад і послідовність технологічних операцій, незалежно від типу лопатки.

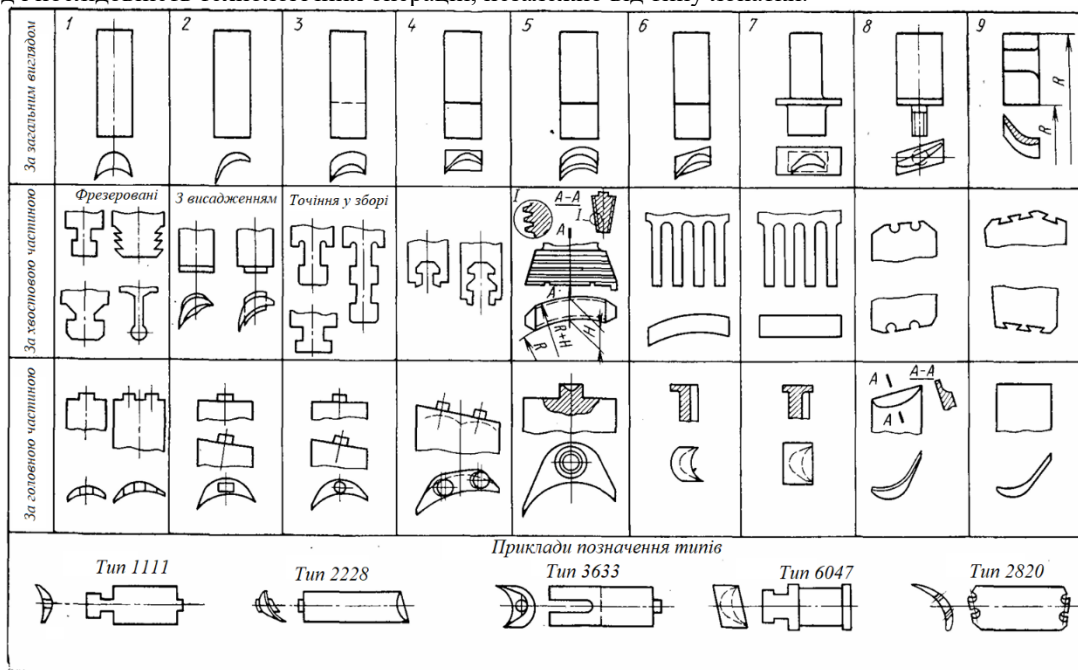


Рис.5 – Схема типізації турбінних лопаток, яка розроблена Н.Я. Бауманом

Зазначені положення були покладені в основу при розробці схеми типізації (рис. 5.), запропонованої Н. Я. Бауманом. За цією схемою позначенням і одночасно характеристикою типу є чотиризначний номер. Перша цифра цього номеру визначає клас лопатки, що характеризує її службове призначення, належність лопатки до машини визначеного виду та поєднання хвостової та робочої частин лопатки. Критерій класу названий «характеристикою за загальним виглядом». За цією характеристикою можуть бути визначені вид заготовки і склад перших операцій для обробки базових поверхонь.

Друга, третя і четверта цифри номера відповідно визначають найбільш поширені різновиди хвостів, робочих частин і головок лопаток, скомплектовані за їх технологічною однорідністю в сенсі однакового складу та послідовності технологічних операцій їх обробки. Таким чином, ці характеристики є критеріями типізації як самих лопаток, так і технологічних процесів.

Запропонована схема типізації, не претендуючи на широку універсальність як робочу схему, але може бути основою для подальших розробок.

Розробка стандартних процесів здійснюється у два етапи:

1. класифікація частин за типами та за спільністю їхньої конфігурації (частини одного типу повинні мати фундаментально спільний технологічний процес);

2. розробка процесів для кожного типу деталі з розв'язуванням усіх нових технологічних проблем.

Стандартні технологічні процеси розробляються найдосвідченішими кваліфікованими технологами на основі класифікації деталей, при цьому враховується та узагальнюється весь досвід цього заводу, інших суміжних підприємств і іноземних. Оскільки цей досвід постійно накопичується, стандартні процеси не можуть бути стабільними, вони мають періодично працювати щоб бути переглянутим і виправленим, щоб відобразити все нове і передове.

Стандартний технологічний процес є провідним матеріалом для всіх технологів певного заводу, коли він використовується для компіляції робочого технологічного процесу частини або одиниці різних турбін.

Типізація технологічних процесів дозволяє:

1. впровадити передові технології у виробництво та усунути різноманітність у методах виробництва та нормування деталей одного типу;

2. підвищувати продуктивність праці та знижувати вартість виробничих деталей завдяки методам групової обробки;

3. покращувати використання обладнання;

4. оптимізувати технологічну підготовку виробництва, скорочувати час і вартість;

5. створити сприятливі умови для нормалізації інструменту та оснащення, зменшення його номенклатури та підвищення коефіцієнта обладнання завдяки більшій застосовності;

6. підвищувати технологічність конструкції, включаючи уніфікацію деталей.

Організаційно-технічними передумовами створення групового автоматизованого механообробного виробництва робочих лопаток є наявність уніфікованих конструктивних елементів, що дозволяють класифікувати лопатки за типами та формувати групи з однаковими технологічними ознаками. Це забезпечує можливість стандартизації технологічних процесів, скорочення номенклатури інструменту та оснащення, а також оптимізацію використання обладнання. Важливим чинником є впровадження систем автоматизованого проектування та управління виробництвом, що створює умови для гнучкої перенастроюваності та потокової організації виробничих процесів.

Технологічні передумови включають розробку стандартних технологічних процесів для груп деталей зі складним профілем, застосування верстатів з числовим програмним керуванням та використання імітаційного моделювання для оптимізації маршрутів обробки. Це дозволяє знизити трудомісткість, підвищити точність виготовлення та скоротити виробничий цикл. У сукупності зазначені фактори формують основу для створення ефективної системи групового автоматизованого механообробного виробництва робочих лопаток парових турбін, що відповідає сучасним вимогам до якості та економічності виробництва.

Висновки. Аналіз показав, що застосування групової технології у серійному виробництві робочих лопаток парових турбін є ефективним шляхом зниження трудомісткості та оптимізації виробничих процесів. Класифікація та типізація конструктивних елементів дозволяють уніфікувати технологічні маршрути, скоротити номенклатуру інструментів та оснащення, а також забезпечити більш раціональне використання обладнання. Це створює умови для переходу від індивідуального підходу до серійної організації виробництва, що особливо важливо при виготовленні великої кількості лопаток для турбін великої потужності. Використання імітаційного моделювання у процесі розробки та впровадження групових технологій забезпечує можливість прогнозування ефективності виробничої системи, вибору оптимальних маршрутів обробки та оцінки техніко-економічних показників. Такий підхід дозволяє не лише підвищити продуктивність і якість виготовлення лопаток, але й забезпечити гнучкість виробництва та його відповідність сучасним вимогам енергетичного машинобудування.

Список літератури

1. Tung, C. Tool Path Generation and Manufacturing Process for Blades of a Compressor [Текст] / C. Tung and P.-L. Tso / RotorWorld Academy of Science, Engineering and Technology 76 – 2011. – С. 172-177.
2. Христофоров В.В., Вайсбург В.А., Журавлев В.Н. Эффективность использования многокоординатных станков с ЧПУ. В кн.: Автоматизация проектирования машиностроительных предприятий. Киев: РДЭНТП, 1981, С. 135-136.
3. Xiong, Ying. The development and manufacture of fixed ultrasonic inspection reference reflectors and transducers for compressor blade dovetails [Електронний ресурс] Ying Xiong, Dexiu Dong, Jiangang Duan / 2011 CANSMART CINDE IZFP/ URL:<http://www.ndt.net/search/abstract.php3?AbsID=1> 1479 (дата звертання 01.06.2014).
4. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : навч. посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с.
5. Sergey Dobrotvorskii, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.
6. Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник [для высш. учебн. заведений] / А. И. Грабченко, В. А. Залого, Ю. Н. Внуков и др.; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.
7. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов, Д. В. Митришин. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.

8. Жовтобрюх В. А. Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ : монография / В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков. – Днепр: ЛІРА, 2019. – 480 с.
9. Letiuk V. "Laser measuring systems in the production of steam turbine blades". X International Scientific and Practical Conference "Science and Practice implementation to modern society", June 4-5, 2021 in Manchester, Great Britain – С. 655-657.
10. Ищенко Г.И., Ищенко М.Г. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПАО «ТУРБОАТОМ» /ISSN 2078-7677. Високі технології в машинобудуванні, Харків, - НТУ «ХПІ», 2015, випуск 1 (25) – С. 3-17.
11. Turboatomu – 75. Istorija, dostizhenija, perspektivy. V. G. Subbotin and A. A. Bugaec, ed. Kharkov: Zoloty stranicu, 2009. Print.

Bibliography (transliterated):

1. Tung, C. Tool Path Generation and Manufacturing Process for Blades of a Compressor [Текст] / C. Tung and P.-L. Tso / RotorWorld Academy of Science, Engineering and Technology 76 – 2011. – С. 172-177.
2. Khristoforov V. V., Vaysburg V. A., Zhuravlev V. N. Effektivnost' ispol'zovaniya mnogokoordinatnykh stankov s ChPU // Avtomatizatsiya proektirovaniya mashinostroitel'nykh predpriyatiy. - Kiyev: RDEntp, 1981. - P. 135–136.
3. Xiong, Ying. The development and manufacture of fixed ultrasonic inspection reference reflectors and transducers for compressor blade dovetails [Електронний ресурс] Ying Xiong, Dexiu Dong, Jiangang Duan / 2011 CANSMART CINDE IZFP/ [URL:http://www.ndt.net/search/abstract.php?AbsID=1479](http://www.ndt.net/search/abstract.php?AbsID=1479) (data zvernennya: 01.06.2014).
4. Robochi protsesy vysokykh tekhnolohiy v mashynobuduvanni : navch. posibnyk / za red. A. I. Hrabchenka. - Kharkiv: KHDPu, 1999. - 436 s.
5. Sergey Dobrotvorskiy, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobață D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.
6. Integrirovannyye protsessy obrabotki materialov rezaniyem : uchebnik [dlya vyssh. uchebn. zavedeniy] / A. I. Grabchenko, V. A. Zaloga, YU. N. Vnukov i dr.; pod obshch. red. A. I. Grabchenko, V. A. Zalogi. - Sumy: Universitetskaya kniga, 2017. - 451 s.
7. Modelirovaniye sistem : monografiya / G. A. Oborskiy, A. F. Dashchenko, A. V. Usov, D. V. Mitrishin. - Odessa: Astroprint, 2013. - 664 s.
8. Zhovtobryukh V. A., Novikov F. V. Proyektirovaniye i avtomatizirovannoye programmirovaniye sovremennykh tekhnologiy dlya stankov s ChPU : monografiya. - Dnepr: LIRA, 2019. - 480 s.
9. Letiuk V. Laser measuring systems in the production of steam turbine blades // X International Scientific and Practical Conference "Science and Practice Implementation to Modern Society". - Manchester, Great Britain, June 4-5, 2021. - P. 655-657.
10. Ishchenko G. I., Ishchenko M. G. Tekhnologicheskiye vozmozhnosti PAO «Turboatom» // Visoki tekhnologiyi v mashynobuduvanni. - Kharkiv: NTU «KHPI», 2015. - Vyp. 1 (25). - P. 3-17.
11. Turboatomu – 75. Istoriya, dostizheniya, perspektivy / pod red. V. G. Subbotin, A. A. Bugaec. - Kharkov: Zoloty strantsy, 2009. - Print.

Надійшла (received) 10.02.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-099-95-123-96, e-mail: spirit.nrg.13@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9600-2371

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф. Семка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-096-635-93-72, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Шелковий Олександр Миколайович (Shelkovyi Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна;

Тел.: +38-050-945-28-93, e-mail: alnikshelk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7414-4854

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – доктор філософії, асистент кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID 0009-0006-3781-6144