

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису
УДК 621.002:539.373:

КУХТИК Тамара Василівна

**ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ
ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ
ДЕФОРМАЦІЙ ДЕТАЛЕЙ ВАЖКОГО
МАШИНОБУДУВАННЯ**

Спеціальність 05.02.08 — Технологія
машинобудування

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого
ступеня доктора технічних наук

Київ — 1994



Дисертація в рукописом.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії.

- Науковий консультант — заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор Гавриш Анастолій Павлович
- Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор Бондаренко Леонід Іванович
- доктор технічних наук, професор Лебедєв Вадим Георгієвич
- доктор технічних наук, професор Петко Ігор Володимирович
- Провідне підприємство — Краматорське верстатобудівне виробниче об'єднання

Захист відбудеться, 24 " вересня 1994 р. о 15 годині на засіданні Спеціалізованої Ради Д 068.14.10 в Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, гол. корпус, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці КПІ.

Автореферат розісланий „ 8 “ вересня 1994 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор _____ Н.С. Равська

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Одним з головних напрямків підвищення якості виготовлення деталей важкого машинобудування є завдання забезпечення заданої точності обробки поверхонь. Ця проблема для відповідальних унікальних великогабаритних деталей важкого машинобудування виросла у останній час у одну з важливих проблем технології машинобудування у силу причин, основними з яких є: безперервне підвищення вимог до точності виготовлення деталей, до їх надійності, якості та довговічності; все більш широке застосування електротехнологічних методів обробки важкооброблюваних сталей та сплавів. Нині існуюча технологія виготовлення деталей важкого машинобудування включає у себе великий об'єм термічних операцій для стабілізації залишкових напруг, що значно, у 2-3 рази, збільшує технологічний цикл їх виготовлення. Ефективність таких прийомів та методів низька, тому що ці методи застосовуються на заготовельному та чорновому етапах обробки. Тому використання у промисловості комбінованих електротехнологічних методів для обробки унікальних відповідальних деталей важкого машинобудування є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи - розробка наукових основ технологічних методів підвищення точності виготовлення деталей у важкому машинобудуванні на базі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, закономірностей зниження залишкових напруг та деформацій при використанні електротехнологічних методів обробки.

Для цього у дисертаційній роботі вирішувались наступні завдання:

1. Розробити технологічні методи, які забезпечують точність обробки малошорстких деталей з використанням енергії електричних та магнітних полів при різанні.

2. Вивчити механізм, розробити принципальну та математичну модель процесу створення технологічних залишкових напруг та деформацій при електротехнологічних методах обробки.

3. Дослідити та установити основні закономірності енергетичної рівноваги залишкових напруг при використанні електротехнологічних методів обробки малошорстких деталей.

4. Вивчити процес технологічної спадковості залишкових напруг та деформацій при введенні у зону різання енергії електричного та магнітного полів.

5. Дослідити та установити основні закономірності впливу технологічних факторів на залишкові напруги та деформації при електротехнологічних методах обробки деталей різних класів.

6. Розробити аналітичні методи розрахунку технологічних залишкових напруг та деформацій малошорстких деталей типу тіл обертання та коробчатої форми, а також провести їх експериментальну перевірку.

7. Розробити нові методи оцінки напружено-деформованого стану деталей.

8. Розробити науково-обґрунтовані рекомендації по підвищенню точності виготовлення малошорстких деталей важкого машинобудування за рахунок зниження залишкових деформацій при використанні електротехнологічних методів та забезпечення потрібної якості поверхневого шару.

Загальна методика досліджень. Дослідження напружено-деформованого стану деталей при дії енергії електричних та магнітних полів виконано з використанням фундаментальних положень технології машинобудування, дислокаційної теорії, теорії пружності та пластичності, теплопровідності, графів та подібності, апробованих аналітичних та чисельних методів аналізу. Адекватність математичної моделі процесу спадковості та перерозподілу залишкових напруг при використанні електротехнологічних методів обробки деталей виконана та підтверджена з використанням теорії планування експериментів за допомогою сучасних методів дослідження: комплексу металографічних, рентгенографічних та тензометричних методів.

Наукова новизна. 1. На основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень технологічних залишкових деформацій деталей важкого машинобудування типу станин, подушок, прокатних валків та інших деталей розкриті загальні закономірності перерозподілу залишкових напруг, сформульовані основні принципи зниження залишкових деформацій при використанні енергії електричного та магнітного полів при обробці.

2. На основі введеного поняття "енергетичної рівноваги залишкових напруг" розроблено принципову схему та математичну модель механізму утворення технологічних залишкових напруг та деформацій при використанні електротехнологічних методів обробки таких як електромеханічне точіння, стружання, фрезерування та

електромагнітне точіння і фрезерування.

3. Розроблено принципіальну методуку аналітичного визначення технологічних залишкових напруг та деформація при розв'язанні задачі пружнопластичного навантаження при обробці деталей з використанням енергії електричного та магнітного поля, запропоновані нові методи виміру залишкових напруг з використанням акустичних характеристик обробленої деталі і енергетичних параметрів поверхневого шару.

4. На основі вивчення процесу технологічної спадковості залишкових деформація та напруг при побудові фізичної моделі напруженого стану деталі при обробці показано якісні та кількісні зв'язки технологічної спадковості за допомогою теорії графів, що дозволило отримати наочні рекомендації по вивченню напруженого стану деталі при дії електричного та магнітного поля. При цьому уведення електротехнологічних операції у технологічний процес виготовлення деталей є "бар'єром" для подальшого перерозподілу залишкових напруг.

5. Досліджено та розкрито основні закономірності впливу технологічних та конструктивних факторів на залишкові деформації та напруги при електромеханічній та електромагнітній обробці деталей.

6. Розроблено емпіричні залежності для визначення залишкових напруг та деформація при використанні енергії електричних та магнітних поля, які ураховують фізико-хімічний стан поверхневого шару заготовки, а також фізичні характеристики: силу струму, напруженість магнітного поля.

Практична цінність. На основі виконаних теоретичних, експериментальних досліджень та розробок вирішено важливе народно-господарче завдання підвищення якості виготовлення деталей важкого машинобудування.

Розроблені у дисертації рекомендації по підвищенню точності обробки деталей важкого машинобудування, способи та устаткування для дослідження залишкових напруг та деформація відрізняються практичною цінністю, новизною та захищені 17 авторськими свідоцтвами і патентами.

На їх основі створені прогресивні технологічні процеси та оснащення для обробки деталей типу станів, подушок прокатних станів, прокатних валків, станів та шпінделей важких токарних верстатів з використанням електротехнологічних методів обробки.

Установлені закономірності та методи зниження технологічних залишкових деформацій деталей важкого машинобудування при використанні енергії електричних та магнітних полів носять загальний характер та рекомендуються для використання на усіх машинобудівних заводах.

Розроблено підсистему проектування оптимального маршруту обробки деталей з урахуванням технологічної спадковості залишкових напруг.

Науково обґрунтовані рекомендації по підвищенню точності виготовлення відповідальних деталей із застосуванням енергії електричних та магнітних полів використовуються в учбовому процесі для студентів механічних спеціальностей по дисциплінам "Основи технології машинобудування" та "Технологія автоматизованого виробництва", у практичні діяльності аспірантів та наукових співробітників машинобудівних підприємств.

Реалізація роботи. Дослідно-промислова перевірка та упровадження технологічних методів зниження залишкових напруг та деформацій були проведені на Донецькому заводі гірничого машинобудування при обробці редукторів шахтопідомних машин, на орендному об'єднанні "Ново-Краматорський машинобудівний завод" при обробці подушок, станів та прокатних валків прокатних станів, на Краматорському верстатобудівному виробничому об'єднанні при обробці станів та шпінделей важких токарних верстатів, на Самарському заводі "Строймашина" при обробці корпусних деталей та інших підприємствах, у результаті чого залишкові деформації зникають на 25-30%, а продуктивність обробки на чергових обдирочних операціях при цьому зростає у 1,5-2 рази.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на республіканських та міжвузівських науково-технічних конференціях:

- Науково-технічна конференція "Прогресивные технологические процессы механосборочного производства" - Херсон, 1991;
- Науково-технічна конференція "Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий" - Москва, 1991;
- Республіканська науково-технічна конференція "Качество и надежность технологических систем механообработки" - Краматорськ, 1991;
- Науково-технічна конференція "Остаточные напряжения - резерв прочности в машиностроении" - Ростов-на-Дону, 1992;

- Науково-технічна конференція "Технологические методы повышения эффективности и качества механоборочного производства" - Донбай, 1992;

- Міжвузівська конференція "Качество и надежность технологических систем" - Краматорськ, 1992;

- Науково-технічна конференція "Новые технологические процессы механической обработки" - Одеса, 1992;

- Науково-технічна конференція "Термодинамика технологических систем" - Краматорськ, 1993;

- Всесоюзна науково-технічна конференція "Импульсная обработка металлов" - Харков, 1990.

Публікації. Основний зміст і результати дисертаційної роботи відображені у 54 публікаціях, у тому числі у 17 авторських свідоцтвах і патентах.

Структура і об'єм роботи. Робота складається із вступу, 6 розділів, закінчення, переліку списку літератури і додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

На сучасному етапі розвитку машинобудування одним з важливих питань, пов'язаних з підвищенням якості випускаємої продукції є боротьба з шкідливим впливом залишкових напружень на досягнуту механічною обробкою точність форми та відносне розміщення поверхонь.

Роботи ряду дослідників показали, що галузь технології машинобудування, пов'язана з технологічними залишковими деформаціями деталей машин, є однією з найменш досліджених, хоч ще у роботах А.П. Сколодовського, О.І. Каширіна, Я.Е. Фрідмана, О.С. Матаїна указувалось на те, що питання про залишкові напруження заслуговує особливого вирішення при розробці технології виготовлення унікальних великогабаритних деталей важкого машинобудування.

Аналіз стану проблеми на основі опублікованих робіт та технології виготовлення маложорстких деталей важкого машинобудування показав, що проблема зникнення залишкових деформацій деталей з урахуванням вимог до точності їх виготовлення та якості поверхневого шару у останній час стала актуальною проблемою технології машинобудування у силу причин, основними з яких є:

безперервне підвищення вимог до точності виготовлення

устаткування та його якості, подальшої працездатності, надійності та довговічності:

- збільшення номенклатури великогабаритних потужних та високошвидкісних машин, які характеризуються складними конструктивними елементами та великими габаритними розмірами і масою;

- необхідність скорочення технологічного циклу їх виготовлення.

Більшість дослідників В.М. Шахурін, С.С. Лосев, О.Ю. Кошубинський, Б.А. Кравченко, С.П. Гімкул, О.М. Овсенко, С.О. Букачій, О.І. Промтов, Г.П. Козирук рахують, що у основі утворення технологічних залишкових деформацій лежать загальні закономірності, вивчення та дослідження яких можна використати для підвищення точності обробки деталей.

Проте теоретичні та технологічні основи керування залишковими напруженнями і деформаціями у процесі обробки деталей недостатньо вивчені, у зв'язку з чим для зменшення залишкових напруг та деформацій поширено часто використання традиційних методів обробки таких як природне та штучне старіння, статичне та динамічне навантаження, віброобробка. Ці методи малоєфективні, застосовуються до або після чорнового етапу обробки, збільшують технологічний цикл виготовлення деталей.

Основні види технологічних залишкових деформацій проявляються при нерівноважному напруженому стані деталі по всьому циклу її виготовлення, коли знімаються великі величини припусків, що обумовлює використання спеціальних технологічних прийомів та методів на чорновому та півчистовому етапах обробки. Для цього необхідно мати розрахункові залежності, які пов'язують напруги, які вносяться у поверхневий шар деталі у процесі обробки, а також знати взаємозв'язок технологічних залишкових деформацій з основними технологічними та конструктивними факторами.

Багато відомих робіт по дослідженню напруженого стану деталі при обробці присвячені окремим технологічним операціям обробки р'язанням з використанням енергії електричного та магнітного полей, проте ізольоване вивчення характеристик операцій технологічного процесу не може дати повної картини формування якості поверхневого шару деталей.

Тому досить гостро стоїть питання про необхідність удосконалення технологічних процесів виготовлення деталей важкого машинобудування та керування залишковими напруженнями та деформаці-

ями при використанні прогресивних спеціальних електротехнологічних методів обробки. Комплексний підхід до вивчення та теоретичного обґрунтування використання електротехнологічних методів для підвищення точності обробки по всьому технологічному циклу виготовлення є основним напрямом розвитку сучасної технології машинобудування як науки.

Вирішення завдання підвищення точності обробки деталей пов'язано з вивченням питань виникнення та перерозподілу залишкових напруг, виявлення впливу технологічних факторів, які базуються на технологічній спадковості процесу утворення залишкових деформацій.

Весь технологічний процес виготовлення деталей супроводжується зміною їх напружено-деформованого стану. Розрахунки короблення деталей при механічній обробці можливі лише у випадку, коли відомі закони розподілу залишкових напруг по перерізу деталі. У важкому машинобудуванні більшість заготовок проходять термічну обробку з регулярним режимом теплообміну, при якому критерій Фур'є $Fo > 0,3$ та розподіл залишкових напруг по перерізу деталі відбувається по параболі другого степеню.

У цьому випадку існують наступні залежності Л.С. Коштантінова для визначення залишкових напруг та деформація:

$$\sigma_i = \frac{3\sigma_0 \cdot x^2}{d_0^2} - \sigma_0 \quad (1)$$

$$f_i = \frac{3}{8} \frac{\sigma_0 \cdot L^2 \cdot e}{E \cdot d_0^2} \quad (2)$$

- де
- σ_0 - напруги у центральній частині деталі, МПа;
 - d_0 - половина товщини деталі, м;
 - x - поточна координата, м;
 - L - довжина деталі, м;
 - e - величина віддаляемого шару, м;
 - E - модуль пружності, Н/м.

Для практичного використання приведені співвідношення були доповнені С.П. Гінкулом:

$$\sigma_0 = \frac{B E K \alpha t \cdot d \cdot d_0}{3 \lambda} \quad (3)$$

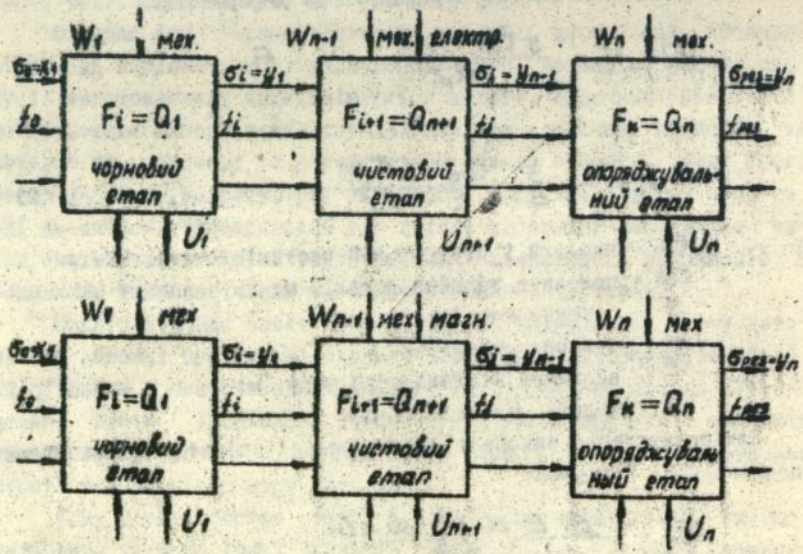
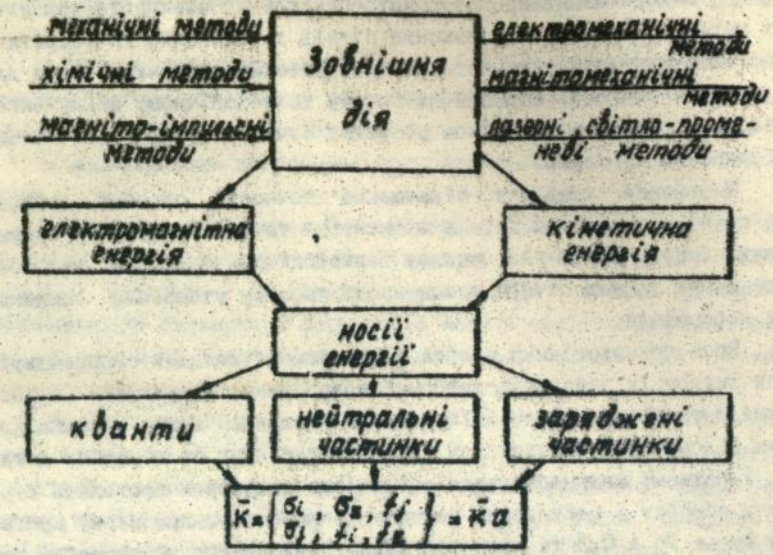


Рис. 1 Структурна схема дослідження електротехнологічних методів обробки

$$f_i = \frac{3}{2} \frac{\kappa \sigma \cdot d \cdot e}{3 \lambda} \quad (4)$$

де β^i - коефіцієнт температурного розширення;
 λ, λ' - коефіцієнти температуро- та теплопровідності.

У загальному випадку при механічних, електрофізичних та інших різних методах обробки з поверхні деталі разом з припуском віддаляється частина залишкових напруг, які були у заготовці до обробки, і крім того сам процес обробки визиває зміну залишкових напруг, які визначаються по залежності О.М. Овсеєнко

$$\sigma_0(x) = \sigma_n(x) - \sigma_m(x) - \sigma_p(x) \quad (5)$$

де σ_n - початкові напруги;
 $\sigma_m(x), \sigma_p(x)$ - напруги від вигину та поздовжніх деформацій.

У деяких окремих випадках додаткові напруги можуть бути "внесені" у деталь і без зняття припуску (при поверхнево-пластичному деформуванні, впливі імпульсним електричним або магнітним полем, лазерною та електронно-променевою обробкою, рис. 1).

У випадку зняття припуску з поверхні відбувається порушення енергетичного стану деталі, за рахунок моменту неврівноважених внутрішніх сил та перерозподілу залишкових напруг, виникнення надлишкової енергії деформування, яка визначається з відомого співвідношення

$$W_{\text{над}} = \frac{M_{\text{вн}} \cdot h^2}{8 E J} = \frac{\sigma_0 \sigma_y h^2}{8 E J} \quad (6)$$

Механічна обробка деталі характеризується двома водночас протікаючими процесами: зміцненням та розміцненням. Інтенсивність протікання цих процесів визначається наявністю енергії активації у формозмінюваному матеріалі та швидкістю деформації.

Природа цієї енергії активації сама різна: від нагріву металу до радіаційного або ультразвукового випромінювання. При використанні енергії електричного або магнітного поля, уведеної у оброблювану деталь для зниження рівня залишкових напруг та їх енергетичної рівноваги відбувається поліпшення умов переміщення та виходу дислокацій на поверхню зерен кристалу.

Електротехнологічні методи обробки формують на визначеній ділянці поверхневого шару деталі локалізовану енергетичну дію за рухонок сполучення зовнішніх дій (механічних, хімічних, електро-

магнітних, ядерних). Енергія при цьому передається двома шляхами: електромагнітним полем, носіями якого є кванти випромінювання та трансформацією запасу кінетичної енергії, носії якої - нейтральні та заряджені частки.

Під зовнішньою дією мається на увазі спосіб підводу енергії до оброблюваної поверхні деталі та його кількісна характеристика, яка характеризує енергетичну рівновагу оброблюваної деталі. При цьому необхідно відзначити, що зміна параметрів поверхневого шару, таких як залишкова напруга, мікроструктура, фазовий стан, мікро- та макрорельєф, параметри субструктури відбуваються при визначеній зовнішній дії з конкретним сполученням основних параметрів електротехнологічних методів обробки.

У загальному випадку потребуємо сполучення дія, забезпечуючих енергетичну рівновагу залишкових напруг оброблюваної деталі може бути наведено слідуючим співвідношенням

$$W_{\text{акт}} = W_{\text{нап}} = \frac{\sigma_0 \cdot S_y \cdot h^2}{8 E J} \quad (7)$$

На основі наведеного співвідношення отримані залежності, які дозволяють установити взаємозв'язок залишкових напруг та деформацій при електротехнологічних методах обробки деталей:

$$\sigma_0 = \frac{J}{L} \sqrt{\frac{8 E J_x R T}{S_y}} \quad (8)$$

$$f_i = \frac{3 J e L}{8 E d_0^2} \sqrt{\frac{8 E J_x R T}{S_y}} \quad (9)$$

при електромагнітній обробці

$$\sigma_0 = \frac{E J K_{\text{н}} \cdot \pi (K_{\text{ЗМ}} + 0,24) \frac{B^2 \delta^2 U^2 T}{R^2}}{S_y L^2} \quad (10)$$

$$f_i = \frac{3 J e \cdot K_{\text{мп}} (K_{\text{ЗМ}} + 0,24) \frac{B^2 \delta^2 U^2 T}{R^2}}{S_y L^2 d_0^2} \quad (11)$$

де B - величина магнітної індукції;

δ - швидкість зміни магнітного потоку;

K_{np} - коефіцієнт неврахованих втрат;

K_z - коефіцієнт, який враховує магнітні властивості деталі;

M - величина намагнічуваності деталі.

Аналіз отриманих залежностей показує, що енергетичною рівновагою деталі можливо керувати при визначеному сполученні фізико-механічних технологічних параметрів та конструктивних факторів.

Дослідження напружено-деформованого стану деталей при використанні енергії електричного та магнітного полів проводили із застосуванням методу кінцевих елементів для розв'язання задачі пружно-пластичного навантаження з використанням схематизованих кривих деформування деталі. При цьому задача розв'язувалась у 3 етапи.

На першому етапі вирішувалась пружна задача, де напруги визначаються у пружній зоні

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\varepsilon\} \quad (12)$$

де $[D^e]$ - матриця пружності

$$[D^e] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \mu/(1-\mu) & 0 \\ \mu/(1-\mu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\mu)/2(1-\mu) \end{bmatrix} \quad (13)$$

На другому етапі - визначення пластичних деформацій відповідно теорії течії при експериментальному визначенні зони пластичної течії. Визначаються залишки напруги у пластичній зоні

$$\{\sigma\} = [D^p] \{\varepsilon\}$$

де $[D^p]$ - матриця пластичності

$$[D^p] = [D^e] - \frac{(2G)^2}{\frac{1}{2} \sigma^2 (3G+H)} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y & \sigma_x \tau_{xy} \\ \sigma_y \sigma_x & \sigma_y^2 & \sigma_y \tau_{xy} \\ \tau_{xy} \sigma_x & \tau_{xy} \sigma_y & \tau_{xy}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

На третьому етапі розраховуються поля залишкових напруг за результатами перших двох етапів.

Для вивчення напружено-деформованого стану деталі при

електротехнологічних методах обробки розроблено та удосконалено акустичний метод виміру залишкових напруг, при цьому залишкові напруги поверхневого шару можуть бути визначені із слідуючого співвідношення

$$\sigma_0 = \frac{Q E J}{S_y L W} \quad (15)$$

де Q - маса зразка;
 W - власна частота коливань.

Розроблено також безконтактний електромагнітний метод оцінки напружено-деформованого стану деталі за енергією електричного випромінювання. У цьому випадку залишкові напруги можуть бути визначені як

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2 U_{эм} \cdot E J}{S_y \cdot L}} \quad (16)$$

де $U_{эм}$ - енергія електромагнітного випромінювання.

З метою встановлення основних закономірностей впливу технологічних факторів на залишкові напруги та деформації, а також визначення раціональних режимів та умов обробки, досліджувались електротехнологічні методи обробки, такі як електромеханічне точіння, стругання, фрезерування та електромагнітне точіння і фрезерування.

Основні експерименти проводились для досить широкого спектру матеріалів, які застосовуються для деталей у важкому машинобудуванні: сталі 35Л, 45, 40ХН, 90ХФ, 60ХН, чавун СЧ 20 на зразках коробчатої та циліндричної форми, геометрично подібних подушкам та станінам, прокатним валкам прокатних станів.

Дослідження напружено-деформованого стану поверхневого шару зразків виконували з використанням рентгеноструктурного аналізу.

Залишкові напруги 1-го роду для плоско-напруженого стану оцінювали тензометричним (за методом М.М. Давиденкова) та магнітопружним методами.

Для дослідження температури у зоні різання використовували безконтактний оптичний метод за допомогою кремнієвих фотодіодів.

Досліди по електромеханічному та електромагнітному точінню проводили на токарному верстаті 16К20 різцями з пластинками Т15К6.

Досліди по електромеханічному фрезеруванню проводились на

горизонтально-фрезерному верстаті 6P13001. Стальні зразки оброблювались кінцевою фрезєю Φ 40 мм з P6M5 Z = 5 та торцевою фрезєю Φ 125 мм з пластинками T5K10.

Досліди по електромеханічному струганню напрямних станів проводились у виробничих умовах на продольно-стругальному верстаті "LOUDON" різцями з пластинками P18.

Фазовий аналіз при електромеханічному точінні у зразках з сталі 50ХН, 90ХФ, 45ХНМФ показав присутність α -Fe (фериту) та при збільшенні швидкості різання до 120 м/хв - Fe₃C.

Результати розрахунку субструктури та щільності дислокацій у вихідному матеріалі для сталі 50ХН знаходиться у межах $7,09 \times 10^{-12}$ см²; після ЕМО - $1,45 \times 10^{-12}$ см²; для сталі 45ХНМФ - $4,29 \times 10^{-12}$ см²; після ЕМО - $1,01 \times 10^{-12}$ см²; для сталі 90ХФ - $9,98 \times 10^{-12}$ см²; після ЕМО - $4,55 \times 10^{-12}$ см². Спостерігається білий рівномірне розподілення щільності дислокацій по глибині поверхневого шару до 0,27-0,35 мм.

При формуванні сумарної епюри залишкових напруг має місце ефект послідовного переходу залишкових напруг стиску у залишкові напруги розтягування у результаті теплової та силової дії при електромеханічному точінні. При цьому відбувається взаємодія напруг, які утворились у поверхневому шарі від попередніх проходів з напругами, які утворились, були "внесені" при електромеханічній обробці.

Найбільший вплив при електромеханічній обробці на залишкові напруги поверхневого шару робить сила струму, швидкість різання та подача, при цьому величина залишкової деформації на 30-60% менше, чим при звичайному різанні.

Відповідно при електромеханічному струганні найбільш важливими технологічними факторами є сила струму, подача, із збільшенням подачі від 0,8 до 1,8 мм/подв. хід залишкові деформації збільшились на 60-90%, а при збільшенні швидкості різання від 4 до 8 м/хв залишкові деформації збільшились на 20-30%.

При електромеханічному фрезеруванні сталі 35Л із збільшенням швидкості різання від 0,52 до 1,64 м/с, подачі з 90 до 250 мм/хв, сили струму з 80 до 250 А глибина наклепу поверхневого шару зменшується з 300 до 200 мкм, а ступінь наклепу - з 50 до 40%. При цьому деформування поверхневого шару відбувається однаково як по глибині, так і по інтенсивності деформації.

При електромагнітному точінні зразків з сталей 45, 40ХН ви-

явлено, що на поверхні утворюються напруги стиску, при цьому глибина їх проникання залежить від напруженості магнітного поля та швидкості різання, і на глибині 0,28-0,35 мм утворюються напруги розтягування. Уведення у зону різання магнітного поля приводить до збільшення щільності дислокацій до $8,8 \times 10^{-12} \text{ см}^{-2}$, зменшенню розмірів блоків та зерен.

При електромагнітному фрезеруванні при обробці сталі 35Л і сталі 45 на високих швидкостях глибина залягання та рівень залишкових напруг збільшуються на 30-40%. Найменша глибина їх залягання характерна при швидкостях різання $v = 1,2 \text{ м/с}$ та напруженості магнітного поля 800 кА/м.

Використання електротехнологічних методів обробки приводить до утворення специфічного мікрорельєфу оброблених поверхонь, що пов'язано із зменшенням сил різання на 30-50% при електромеханічному точінню. При цьому різниця у висоті по середнім лініям профілю при електромагнітному фрезеруванні не перевищувала 5 мкм. Середньоквадратичне відхилення профілю обробленої поверхні понизилось до 1,2-1 мкм, що пов'язано із зміною механізму деформації сталі при дії електричного та магнітного полів при різанні.

Для розробки математичної моделі процесу виникнення залишкових деформацій деталі досліджувався процес формування якісних та кількісних характеристик обробленої деталі.

Загальна структура технологічного процесу обробки поверхні деталі була зображена як складна багатомірна система керування якістю обробки. Кожна операція характеризується сукупністю факторів, діючих на поверхню деталі та визначаючих характеристики протікання процесу обробки та стану деталі. Множина факторів поділяється на чотири підмножини: вхідні X та вихідні Y - характеристики стану поверхні деталей до та після операції, постійні (некеруємі) W та змінні (керуємі) U - характеристики дії технологічної системи обробки.

Фактори X та Y визначають власні характеристики поверхні деталі, такі як розміри, допуски, шерхатість поверхні, глибину дефектного шару та інші, відповідно до та після операції.

До числа постійних факторів W належать такі технологічні фактори, які у процесі обробки не зазнають зміни. Це, наприклад, параметри верстату, пристрої і т.і.

Підмножина U включає технологічні фактори за допомогою яких можна керувати дією технологічної системи на процес обробки або

які змінюють стан технологічної системи у процесі обробки. До числа цих технологічних факторів належать релаксація залишкових напруг, елементи режимів різання такі як швидкість різання, подача, глибина різання, маршрут обробки, а також похідні від них: розмірний знос інструменту, зміна сил різання.

В роботі розглянуто процес обробки корпусної деталі з урахуванням технологічної спадковості залишкових напруг та деформація. Вихідні характеристики якості поверхні деталі визначаються слідуною функціональною залежністю

$$\bar{y}_{11} = f(\bar{x}_{11}, \bar{w}_{11}, \bar{u}_{11}) \quad (17)$$

Оброблюючи поверхні деталі, робимо зміну технологічної системи обробки. Тому частина змінних параметрів Цюопиняється залежною від виконання першої обробленої поверхні

$$\bar{u}_{21} = f(\bar{u}_{11}(\bar{x}_{11})) \quad (18)$$

Виходячи з цього, залежність якісних характеристик обробленої поверхні i на m -ій операції визначається так:

$$\bar{y}_{im} = f(\bar{x}_{im}, \bar{w}_{im}, \bar{u}_{im}, \bar{u}_{i-1m} \dots \bar{u}_{1m}) \quad (19)$$

Ця залежність визначає вертикальний зв'язок (тобто зв'язок між операціями) при формуванні якісних характеристик оброблюваної поверхні.

Таким чином, окремі підсистеми об'єднуються у загальну систему керування якістю обробки корпусної деталі на декількох операціях. Комплексний вплив факторів технологічної спадковості визначає процес формування якісних характеристик оброблених поверхонь

$$\bar{y}_{im} = f(\bar{y}_{i,m-1}, \bar{w}_{im}, \bar{u}_{im}, \bar{u}_{i-1,m-1} \dots \bar{u}_{1m}) \quad (20)$$

$i \in I \quad m \in M$

При цьому нільвою функцією є результуюча величина залишкових деформацій i -ої стінки корпусної деталі після механічної обробки за $M = 1, 2 \dots t$ операції (переходів)

$$f_{res. i} = \sum_{M=1}^t f_{im} \quad (21)$$

Критерієм є мінімум цільової функції

$$\sum_{m=1}^t f_{im} \leq f_{im. доп.} \quad (22)$$

де $f_{im. доп.}$ - величина залишкових деформацій i -ої стінки деталі у межах допуску.

Змінні, які оптимізуються:

1. Маршрут обробки корпусної деталі.
2. Величина припуску на технологічну обробку.
3. Сила струму або напруженість.

Одним з основних змінних параметру U , визначаючого зміну стану технологічної системи обробки, є залишкові напруги та деформації корпусної деталі. Для якісного та кількісного аналізу деформацій використовували властивості орієнтованого графу, який з одного боку, відображує маршрут обробки усіх стінок деталі, а з другого боку - характер зміни та взаємозв'язок досліджуваних параметрів на визначених етапах обробки деталі (рис.2).

Після термічної обробки кожна стінка деталі має вихідні початкові властивості σ_0 та ϵ_0 . Обробка першої стінки приводить до перерозподілу залишкових напруг, порушенню їх рівноваги по всьому об'єму деталі, що супроводжується деформаціями усіх стінок.

Механізм утворення залишкових напруг та деформацій розглянуто на прикладі обробки поверхні стінки корпусної деталі.

При механічній обробці однієї з поверхонь деталі частина залишкових напруг "уходить" з припуском. У цьому випадку на обробленій поверхні на деякій глибині виникають невірні початкові напруги, еквівалентні озьові силі та вигинаючому моменту. При розкріпленні деталі виникає момент невірних внутрішніх сил від перерозподілу залишкових напруг, що визиває відповідні деформації деталі.

Таким чином, отримана аналітична залежність визначення залишкових напруг після зняття припуску приймає слідуєчий вигляд:

$$\sigma_i(x) = -2\sigma_{0i} - \sigma_i(\epsilon) + \sigma_{ni} - \sigma_{mi} - \sigma_{pi} \quad (23)$$

де σ_{0i} - залишкові напруги i -ої стінки заготовки;
 $\sigma_i(\epsilon)$ - залишкові напруги, які "уходять" з припуском i -ої стінки деталі;

- $\sigma_i(x)$ - сумарні залишкові напруги 1-ої стінки деталі;
 σ_{ni} - початкові напруги 1-ої стінки;
 σ_{mi} - напруги від вигинаючого моменту 1-ої стінки;
 σ_{pi} - напруги від поздовжніх деформацій 1-ої стінки.

У результаті перетворень отримаємо:

$$\sigma_i(x) = -\frac{\beta \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot \beta \cdot E \cdot 2d_{oi}}{3\lambda} \left[1 + \frac{(2d_{oi} - e_i)^2}{2d_{oi}} \right] + \sigma_{ni}(x) - \frac{E}{L_i} \left[\alpha L_i + \frac{\beta f_{oi}}{L_i} (d_{oi} - x_i) \right] \quad (24)$$

- де
- β - коефіцієнт температурного розширення;
 - E - модуль пружності;
 - κ - коефіцієнт пропорціональності;
 - Δt - різниця температур навколишнього середовища та початкової температури тіла перед охолодженням;
 - α - коефіцієнт тепловіддачі;
 - d_{oi} - товщина 1-ої стінки деталі;
 - λ - коефіцієнт теплопровідності;
 - L_i - довжина 1-ої стінки деталі;
 - f_{oi} - стріла залишкового прогину 1-ої стінки деталі;
 - x_i - поточна координата 1-ої стінки деталі.

Залишкові деформації обробленої поверхні деталі визначаються з наступного співвідношення

$$f_i = \frac{(-2\sigma_{oi} - \sigma_i(e) + \sigma_{ni} - \sigma_{mi} - \sigma_{pi}) \cdot S_{wi} \cdot L_i^2}{2 E J_i} \quad (25)$$

- де
- J_i - момент інерції поперечного перерізу 1-ої обробленої стінки відносно нейтральної осі деталі;
 - κ - коефіцієнт, який залежить від вигляду навантаження;
 - S_{wi} - статичний момент площі віддаленого припуску 1-ої стінки відносно нейтральної осі.

Обробка першої стінки приводить до перерозподілу залишкових напруг, порушенню їх рівноваги по всьому об'єму деталі, що супроводжується деформацією усіх стінок деталі. У свою чергу деформація усіх стінок веде до зміни величини результуючих залишкових напруг.

Результуючі залишкові напруги при механічній обробці 1-ої стінки для кожного етапу обробки і для кожної стінки зокрема визначаються так:

$$\sigma_{рез.им} = \sum_{M=1}^t (K_i(m-1) \cdot \sigma_i(m-1) + K_{im} \cdot \sigma_{im}) \quad (26)$$

де $K_i(m-1)$, K_{im} - коефіцієнти спадковості, які ураховують положення напруг від попередньої та наступної операції;

$\sigma_i(m-1)$, σ_{im} - залишкові напруги 1-ої стінки деталі до та після зняття припуску;

$\sigma_{рез.им}$ - результуючі залишкові напруги 1-ої стінки деталі. Аналогічно для залишкових деформацій кожної стінки:

$$f_{рез.им} = \sum_{M=1}^t (C_i(m-1) \cdot f_i(m-1) + C_{im} \cdot f_{im}) \quad (27)$$

де $C_i(m-1)$, C_{im} - коефіцієнти спадковості, які ураховують положення деформація від попередньої та наступної операції;

$f_i(m-1)$, f_{im} - величина деформації 1-ої стінки деталі до та після зняття припуску;

$f_{рез.им}$ - результуюча величина деформації 1-ої стінки деталі.

Наведені залежності дозволяють аналітично оцінити технологічні спадкові зв'язки при обробці стінок корпусної деталі, а також вплив цих зв'язків на точність обробки при різних маршрутах обробки.

На основі математичної моделі розроблені алгоритми вибору оптимального маршруту обробки з урахуванням технологічної спадковості залишкових деформацій при послідовній односторонній обробці корпусних деталей.

У відповідності до поставленої мети та задачами було визначено склад експериментальних досліджень. Об'єктом для досліджень були великі корпусні деталі, де вплив технологічних факторів на залишкові деформації у процесі механічної обробки виражено достатньо яскраво. Були розглянуті корпусні деталі коробчатого перерізу - подушки великих прокатних станів.

Непостійність форми та розмірів перерізів корпусних деталей обумовлювало нерівномірний перерозподіл залишкових напруг, що ускладнювало виявлення кінетики залишкових деформацій корпусної деталі та взаємозв'язку факторів.

чином, деформації у таких тілах будуть подібними, тобто

$$m_{fi} f_i = \frac{m_{Gi} \cdot G_i \cdot m_{sf} \cdot S_y^F \cdot m_{Li} \cdot Li^2 \cdot K}{E \cdot m_{\gamma} \cdot J} \quad (30)$$

де E і K - константи.

Критерії подібності залишкових напруг та деформація мають вигляд:

$$\frac{m_{Gi} \cdot m_{\lambda}}{m_{\sigma} \cdot m_{\sigma_{doi}}} = 1 \quad \frac{m_{fi} \cdot m_{\gamma}}{m_{Gi} \cdot m_{sf} \cdot m_{Li}} = 1 \quad (31)$$

Критерії подібності виходять з гомогенності рівнянь моделі і природи, тобто свідчать про те, що напружено-деформований стан моделі та природи подібні.

При проведенні експериментальних досліджень передбачалося на основі аналізу технологічного процесу механічної обробки корпусної деталі виявити оптимальний маршрут та визначити ефективні рекомендації підвищення точності обробки.

Дослідження проводились у цехах ОО "НКМЗ", СКМЗ (м. Краматорськ) та на експериментальній ділянці кафедри.

Устаткування, на якому оброблювались досліджувані деталі - великі унікальні поздовжньо-стругальні, поздовжньо-фрезерні, карусельні та горизонтально-розточні верстати. У лабораторних умовах дослідження проводились на фрезерних, токарних та внутрішліфувальних верстатах.

Виміри напружено-деформованого стану деталі проводили за допомогою приладу НОН-4М.

Для дослідження відхилення форми отвору застосовувався прилад "TALYROND-3", а також мікрометричні та індикаторні чутроміри. Лабораторні дослідження залишкових напруг та деформацій проводились на зразках, геометрично подібних досліджуванім деталям. У якості основного матеріалу була вибрана найбільш розповсюджена у важкому машинобудуванні лита сталь 35Л ГОСТ 977-75.

Проведені експериментальні дослідження показали, що оптимальним є маршрут N 1 (обробка отвору, обробка верхньої площини, двостороння обробка напрямних та обробка площини основи). Аналіз круглограм, картин деформацій, графіків показав, що зміни форми отвору та відхилення від прямолінійності бокових напрямних до та після механічної обробки мінімальні і не перевищують 10-12%.

Тому обґрунтуванням вибору зразків для експерименту є проведення досліджень за теорією подібності залишкових напруг та деформацій моделі і натурі.

Узагальнена математична модель процесу виникнення залишкових деформацій наведена системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \nabla^2 \theta \\ F_0 &= \frac{\alpha T}{2d_0^2} \geq 0,3 \\ (-\text{grad}_m \theta)_0 &= \beta_i \theta \\ \sigma_{0i} &= -\frac{A \alpha \Delta d_0}{\lambda} \\ \theta(x, y, z) &= \sigma_0 = \text{const} \\ f_{\text{нач}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Виконаний аналіз узагальненої математичної моделі показує, що у геометрично подібних тілах у схожих точках у взаємно відповідні моменти часу, які визначаються критерієм Фур'є, залишкові напруги цих тіл будуть подібні, якщо відносна інтенсивність теплообміну їх з навколишнім середовищем, яка визначається критерієм Біо, буде однією я тією ж.

З урахуванням масштабів моделювання аналітична залежність стане у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} m\sigma_i \sigma_{iz} &= -A \frac{m \alpha d}{m \lambda \lambda} m \Delta d_i \cdot \Delta d_i \left[1 + \frac{(m \Delta d_i \Delta d_i - m \alpha \cdot \alpha_i)^2}{m \Delta d_i \cdot \Delta d_i} \right] + \\ &+ m \sigma_{0i} \cdot \sigma_{0i}(x) - \frac{E}{m \lambda_i \cdot \lambda_i} \left[m \lambda_i \cdot \lambda_i \cdot \Delta t_i \frac{\partial m \lambda_i \cdot \lambda_i}{m \lambda_i \cdot \lambda_i} (m \Delta d_i \cdot \Delta d_i - m \alpha_i \cdot \alpha_i) \right] \quad (29) \end{aligned}$$

де A і E - константи рівняння.

Уведення множників подібного перетворення для залишкових напруг і деформацій значить, що при однакових значеннях критерію Біо у схожих точках геометрично подібних тіл та у взаємно відповідні моменти часу залишкові деформації, які визначаються залишковими напругами, будуть відрізнятися тільки масштабом.

Статистичну обробку експериментальних даних, перевірку адекватності моделі проводили із застосуванням апарату математичної статистики з використанням критеріїв Пірсона, Стюдента, Кірхгофа, Фішера.

Проведені дослідження дозволили установити адекватність розробленої математичної моделі, підтвердити правомірність положень та висновків.

Розроблена та підтверджена експериментально методика формування математичної моделі була покладена у основу підсистеми оптимального вибору маршруту обробки корпусних деталей з урахуванням технологічної спадковості залишкових напружень і деформацій (рис.3).

На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, аналізу технологічних та конструктивних факторів у роботі сформульовані принципиальні положення по зниженню технологічних залишкових деформацій деталей важкого машинобудування, таких як подушки прокатних станів, прокатні валки, шпінделі важких токарних верстатів.

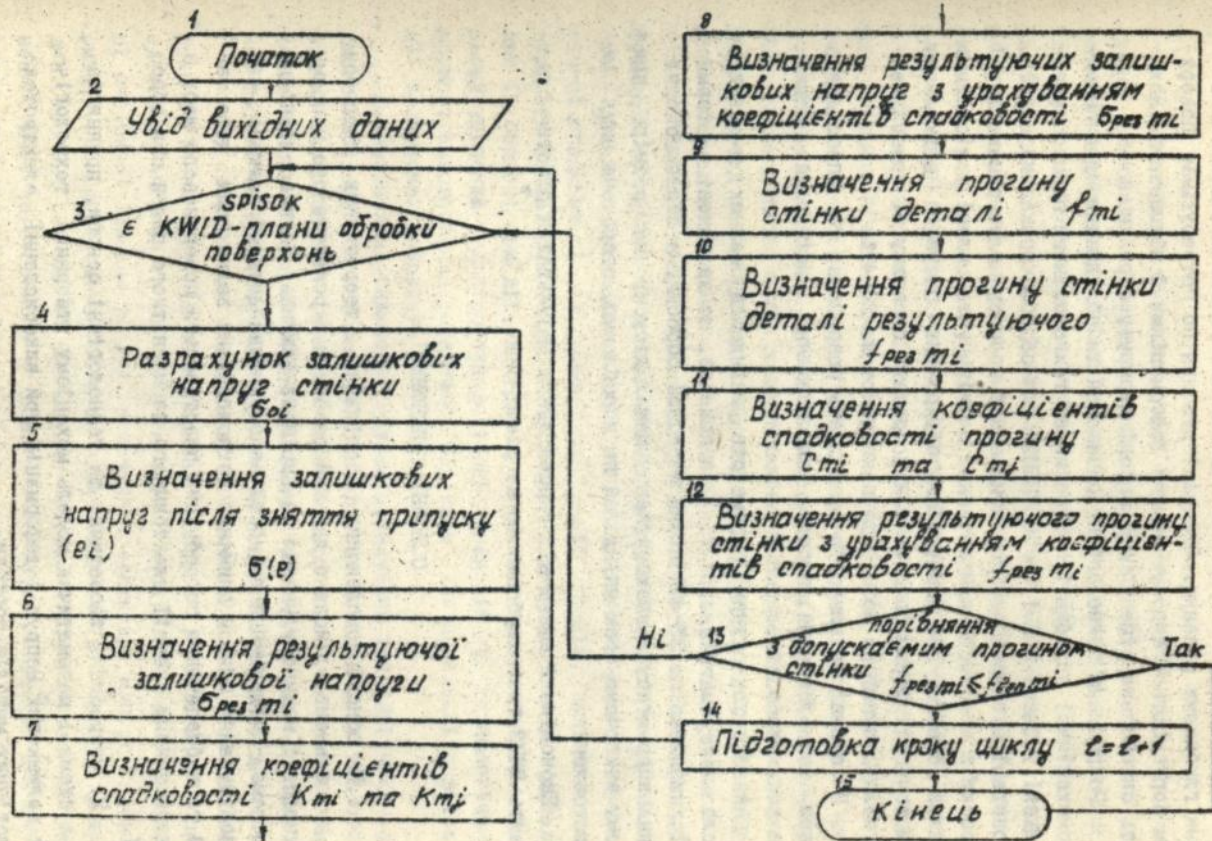
Аналіз напружено-деформованого стану подушок прокатних станів (група II за класифікацією, існуючою на ОО "НМЗ") та розрахунок точностних параметрів обробки дозволив визначити оптимальний маршрут обробки поверхонь подушок, який полягає у наступному:

- чорнова електромеханічна обробка поверхонь та отвору;
- чистова обробка (шавряще фрезерування поверхонь);
- опоряджувальна обробка отвору.

Проведені дослідження показали, що за пропонуємим варіантом технологічного процесу обробки подушок величина відхилення від прямолінійності напрямних поверхонь не перевищувала 0,05 мм. Зміни форми отвору протягом двох місяців після остаточної обробки не перевищувала технічних вимог до точності.

Розроблена методика формування математичної моделі вибору оптимального маршруту обробки складена у основу створеної підсистеми.

Підсистема дозволяє прогнозувати стан деталі, імітуючи увесь цикл механічної обробки. Вихідна інформація дає кількісну оцінку залишкової деформації потребуємих поверхонь (або усіх поверхонь), яка очікується після механічної обробки кожної поверхні деталі, або на остаточної стадії механічної обробки. Підсистема



Алгоритм вибору оптимального маршруту обробки корпусної деталі

тема здійснює цілеспрямоване перебирання різних маршрутів з різними глибинами різання. Отримані рішення по потрібним поверхням порівнюються з допустимими деформаціями і підсистема знаходить оптимальне рішення при виборі маршруту обробки.

Розроблене технологічне оснащення та обладнання для електромеханічної обробки і прогресивний технологічний процес запроваджені у цехах № 3 і 5 ОО "НKMЗ" для обробки прокатних валків. Проведені експерименти по оптимізації процесу електромеханічної обробки з використанням активних планів, установлені раціональні режими обробки. При цьому після обдирочних операцій відхилення від точності форми опорних шийок прокатного валку не перевищувала поля допуску на розмір та понизились на 30-40%.

На основі результатів досліджень розроблено та запроваджено новий технологічний процес виготовлення шпінделей важких токарних верстатів.

Аналіз точностних параметрів шпінделів важких верстатів після електромагнітного т... показав, що залишкові деформації знизились на 25-40% після чорнової обробки, а після опоряджувального етапу - знаходились у межах допуску на розмір, при цьому виключено брак шпінделей по коробленню, скорочено цикл їх виготовлення.

Економічний ефект від запровадження результатів роботи становить 2673 тис. карбованців на рік.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. На основі комплексних досліджень, теоретичних розробок та узагальнень здійснено дальший розвиток перспективного напрямку технології машинобудування та вирішена важлива науково-технічна проблема - підвищення точності виготовлення деталей важкого машинобудування шляхом зниження технологічних залишкових деформацій та забезпечення потрібних властивостей поверхневого шару з використанням енергії електричного та магнітного полей при обробці.

2. Розроблені теоретичні та технологічні основи, принципова схема і математична модель механізму утворення технологічних залишкових напруг і деформацій при використанні електротехнологічних методів обробки.

3. Досліджені та установлені основні закономірності енергетичної рівноваги залишкових напруг при використанні електротехнологічних методів обробки, таких як електромеханічне точіння, стругання, фрезерування та електромагнітне точіння і фрезерування. При цьому, значні якісні показники стану поверхневого шару, такі як залишкові напруги заготовки, з'являється можливість прогнозування та керування напружено-деформованим станом усієї деталі на етапі технологічного проектування та виготовлення.

4. Розроблено принципальну методіку аналітичного визначення технологічних залишкових напруг та деформацій з використанням МТЕ: при розв'язанні задачі пружно-пластичного навантаження при обробці деталі з використанням енергії електричного та магнітного полей запропоновано експериментально-розрахунковий метод для квазістаціонарного температурного поля з побудовою термодеформограм.

5. Вивчено процес технологічної спадковості залишкових деформацій та напруг на основі аналізу фізичної моделі напруженого стану деталей. Установлені якісні та кількісні зв'язки технологічної спадковості за допомогою теорії графів, що дозволяє отримати наявні рекомендації по зміні напруженого стану деталі при її обробці при дії електричного та магнітного полей. При цьому введення електротехнологічних операцій у технологічний маршрут виготовлення деталей є "бар'єром" для подальшої релаксації залишкових напруг та деформацій.

6. Розроблені інженерні методи визначення технологічних залишкових напруг та деформацій маложорстких деталей типу тіл обертання та коробчатої форми, а також запропоновані виміри залишкових напруг з використанням акустичних характеристик оброблюваної деталі та енергетичних параметрів поверхневого шару деталі.

7. Досліджені та установлені основні закономірності впливу технологічних факторів на залишкові напруги і деформації при електромеханічній та електромагнітній обробці деталей. Розроблені емпіричні залежності для визначення залишкових напруг і деформацій при електромеханічній та електромагнітній обробці деталей. Указані залежності ураховують фізико-хімічний стан поверхневого шару заготовки та дозволить змінювати напружено-деформований стан деталі при впливі різних технологічних факторів, а також сили струму і напруженості електричного та магнітного полей.

8. Істотний вплив на залишкові деформації нежорстких деталей робить технологічний маршрут обробки. Для деталей типу подушок прокатних станів найбільш раціональною є схема обробки, яка включає електромеханічну обробку центрального отвору під підшипник та одночасне електромеханічне фрезерування напрямних поверхонь. При цьому залишкові деформації на чорновому етапі зникають на 25-30%.

9. Досліджено вплив електротехнологічних методів обробки на стан поверхневого шару. Установлено, що після електромеханічної обробки відбувається зниження залишкових напружень на 15-25%, на глибині від 0,2-0,3 мм утворюється дрібнозерниста структура поверхневого шару деталі, при цьому мікротвердість підвищується у 1,25-1,5 рази порівняно з основним металом. Рентгенографічні дослідження поверхневого шару при електромагнітній обробці свідчать про те, що здрібнювання блоків та зерен супроводжується підвищенням щільності дислокації від $3,28 \times 10^{-12}$ до $3,2 \times 10^{-12} \text{ см}^{-2}$ для сталей 40ХН, 45ХНМФ.

10. На основі результатів досліджень сформульовані основні шляхи зниження технологічних залишкових деформацій маложорстких деталей з урахуванням технологічної спадковості, розроблено підсистему проектування оптимального маршруту обробки деталей та науково-обґрунтовані рекомендації по підвищенню точності їх виготовлення за рахунок керування технологічними залишковими напруженнями та забезпечення потрібних властивостей поверхневого шару. Вони стали базою для розробки прогресивних технологічних процесів виготовлення деталей у важкому машинобудуванні та створення технологічного устаткування та оснащення для використання електротехнологічних методів обробки, які упроваджені у виробництво.

Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано у наступних роботах:

1. Кухтик Т.В., Гинкул С.П., Михайлов А.В., Пестов В.С. Определение величины коробления корпусных нежестких деталей // Технология судостроения. - 1964. - № 7. - С. 5-7.

2. Кухтик Т.В., Гинкул С.П., Михайлов А.В., Пестов В.С. Примечание расчёта коробления методом сил для обеспечения условий монтажа механически обработанных деталей // Технология судостроения. - 1965. - № 7. - С. 40-42.

3. Гинкул С.П., Кухтик Т.В., Михайлов А.В., Пестов В.С. Повышение точности изготовления корпусных деталей // Технология судостроения. - 1986. - № 5. - С. 57-59.

4. Гинкул С.П., Кухтик Т.В., Михайлов А.В. Оптимальная последовательность операций механической обработки корпусных деталей / Судостроительная промышленность серия "Технология и организация производства судового машиностроения". - 1986. - вып. 4. - С. 31-37.

5. Кухтик Т.В., Кухтик В.С., Гинкул С.П. Управление процессом воробления корпусных нежестких деталей при механической обработке в ГПС / ЦНИИТЭИтяжмаш "Деponированные научные работы" ВИННИ. - 1987. - № 1 (183). - С. 173.

6. Кухтик Т.В., Кухтик В.С. Разработка отраслевых методических материалов по определению экономической эффективности САПР / ЦНИИТЭИтяжмаш "Деponированные научные работы" ВИННИ. - 1987. - № 1 (183). - С. 173.

7. Кухтик Т.В., Матвиенко В.П., Карпова О.В. Автоматизированное приспособление к зуборезному станку // Машиностроитель. - 1987. - № 1. - С. 15-16.

8. Кухтик Т.В., Молчанов Е.П., Черевко В.А., Мелихов С.В., Сочивкин Ю.А. Установка для электромеханической обработки базовых деталей // Машиностроитель. - 1989. - № 6. - С. 25.

9. Гинкул С.П., Кухтик В.С., Кухтик Т.В., Мишкевич О.С. Способ фрезерования нежестких деталей на магнитной плите // Машиностроитель. - 1990. - № 9. - С. 15.

10. Кухтик Т.В., Кухтик В.С., Гинкул С.П. Магнитоимпульсная обработка нежестких деталей // Машиностроитель. - 1990. - № 9. - С. 15.

11. Гинкул С.П., Кухтик Т.В., Черевко В.А., Кухтик В.С., Мишкевич О.С. Способ виброобработки нежестких деталей / Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий: Тезисы докл. научно-техн. конф., Москва, октябрь. - М., 1990. - С. 122-128.

12. Кухтик Т.В., Гинкул С.П. К вопросу энергетического равновесия остаточных напряжений / Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий: Тезисы докл. научно-техн. конф. Москва, октябрь. - М., 1990. - С. 122-128.

13. Гинкул С.П., Кухтик Т.В., Кухтик В.С., Ондюк С.Г., Исаев В.В. Способ лазерно-механической обработки деталей / Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий: Тезисы докл. научно-техн. конф., Москва, октябрь. - М., 1990. - С. 132-133.

14. Кухтик Т.В., Кухтик В.С., Гинкул С.П., Шикевич О.С. Способ лазерно-механической обработки деталей типа станин // Машиностроитель. - 1990. - № 6. - С. 20.

15. Кухтик Т.В., Гинкул С.П., Кобцева И.В. Влияние электрического поля на напряженное состояние материала / Качество и эффективность технологических систем механообработки: Тезисы докл. научно-техн. конф., Краматорск, май. - Краматорск, 1991. - С. 22-23.

16. Кухтик Т.В., Калчанов Е.П., Онищук С.Г. Гребенчатая торцовая фреза для электромеханической обработки деталей / Качество и эффективность технологических систем механообработки: Тезисы докл. научно-техн. конф., Краматорск, май. - Краматорск, 1991. - С. 23-24.

17. Кухтик Т.В., Молчанов Е.П., Исаев В.В. Развитие электромагнитного течения деталей / Качество и эффективность технологических систем механообработки: Тезисы докл. научно-техн. конф., Краматорск, май. - Краматорск, 1991. - С. 34-35.

18. Кухтик Т.В., Исаев В.В., Онищук С.Г. Электромеханическое течение шпинделей тяжелых токарных станков / Качество и эффективность технологических систем механообработки: Тезисы докл. научно-техн. конф., Краматорск, май. - Краматорск, 1991. - С. 34-35.

19. Кухтик Т.В., Каплий Ю.И., Молчанов Е.П., Ерегина Е.А. Электромеханическое течение валков холодной прокатки // Машиностроитель. - 1991. - № 6. - С. 21.

20. Кухтик Т.В., Гинкул С.П., Черевик В.А., Шикевич О.С. Способ виброобработки неместных корпусных и базовых деталей // Машиностроитель. - 1991. - № 3. - С. 23.

21. Кухтик Т.В., Каплий Ю.И. Установка для электромеханической обработки прокатных валков // Тезисы докл. научно-техн. конф., Херсон, сентябрь. - Херсон, 1991. - С. 15-16.

22. Шабин А.И., Кухтик Т.В., Шикевич О.С. Остаточные напряжения при обработке корпусных деталей открытого типа // Вестник машиностроения. - 1992. - № 3. - С. 40-41.

23. Кухтик Т.В., Онищук С.Г., Прокопенко А.В., Мирошников О.В. Электромеханическое строгание станин тяжелых токарных станков / Технологические методы повышения эффективности и качества механосборочного производства: Тезисы докл. научно-техн. конф., Дюбный, май. - К., 1992. - С. 24-25.

24. Кухтик Т.В., Онищук С.Г. Особенности обработки корпусных деталей электромеханическим фрезированием / Тезисы докл. межузловской конф., Краматорск, июль. - Краматорск,

1992. - С. 61-62.

25. Кухтик Т.В., Каплий Ю.И. Высокопроизводительный способ электромеханического точения прокатных валков / Тезисы докл. межвузовской конф., Краматорск, июнь. - Краматорск, 1992. - С. 62-63.

26. Кухтик Т.В., Исаев В.В. Исследование технологических факторов электромагнитного точения / Тезисы докл. межвузовской конф., Краматорск, июнь. - Краматорск, 1992. - С. 64.

27. Кухтик Т.В., Онищук С.Г., Исаев В.В. Исследование технологических факторов при электромеханическом строгании направляющих станин тяжелых токарных станков / Новые технологические процессы в механической обработке: Тезисы докл. научно-техн. конф., Одесса, октябрь. - К., 1992. - С. 15-16.

28. Кухтик Т.В., Ерегина Е.А. Исследование напряженно-деформированного состояния валков при электромеханическом точении / Новые технологические процессы в механической обработке: Тезисы докл. научно-техн. конф., Одесса, октябрь. - К., 1992. - С. 16-17.

29. Кухтик Т.В., Шевченко И.А., Мирошников О.В. Особенности обработки корпусных и базовых деталей электромагнитным фрезерованием / Новые технологические процессы в механической обработке: Тезисы докл. научно-техн. конф., Одесса, октябрь. - К., 1992. - С. 17-19.

30. Кухтик Т.В., Бабенко Г.И., Онищук С.Г., Молчанов Е.П., Мойсеенко Л.И. Высокопроизводительное электромеханическое фрезерование // Машиностроитель. - 1992. - № 3. - С. 15.

31. Кухтик Т.В., Гинкул С.П., Овчаренко В.А., Онищук С.Г., Исаев В.В., Прокопенко А.В. Измерение остаточных напряжений акустическим методом // Машиностроитель. - 1992. - № 5. - С. 23-24.

32. Кухтик Т.В., Онищук С.Г., Мирошников О.В., Лобунец Ю.П. Электромеханическая обработка станин токарных станков // Машиностроитель. - 1993. - № 1. - С. 21.

33. Кухтик Т.В., Онищук С.Г., Прокопенко А.В., Мирошников О.В. Электромеханическая обработка станин тяжелых токарных станков / Термодинамика технологических процессов: Тезисы докл. научно-техн. конф., Киев, октябрь. - К., 1992. - С. 24.

34. Кухтик Т.В., Прокопенко А.В., Шевченко И.А. Особенности электромагнитного метода фрезерования станин / Термодинамика технологических процессов: Тезисы докл. научно-техн. конф., Киев, октябрь. - К., 1992. - С. 29.

35. Кухтик Т.В. Развитие электротехнологических методов обработки деталей / Термодинамика технологических процессов: Тезисы докл. научно-техн. конф., Киев, октябрь. - К., 1992. - С. 37.

36. Гавриш А.П., Гинкул С.П., Кухтик В.С., Кухтик Т.В. Технологические методы снижения остаточных деформаций деталей тяжелого машиностроения. - Краматорск: НИИПТМАШ, 1994. - 144 с.

37. Кухтик Т.В., Каплий В.И., Шевченко И.А., Прокопенко А.В. Технологическая оснастка для электромагнитной обработки станин прокатных станов / Термодинамика технологических систем: Тезисы докл. научно-техн. конф., Краматорск, сентябрь. - Краматорск, 1993. - С. 106.

38. А.с. N 986661 В23 Г21/16 Фреза для нарезания зубчатых колес / Т.В. Кухтик, Е.П. Молчанов Опубл. БИ 1983, N 1.

39. А.с. N 1183306 В23 С3/00 Способ обработки поверхностей нежестких деталей / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, А.Н. Гуськов Опубл. БИ 1985, N 37.

40. А.с. N 1407684 В23 В1/00 Способ обработки нежестких деталей / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик Опубл. БИ 1988, N 25.

41. А.с. N 1446167 С21 Д1/04 Способ снятия остаточных напряжений / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, В.А. Черёвко, В.И. Кухтик, Опубл. БИ 1988, N 47.

42. А.с. N 1445868 В23 С3/00 Способ механической обработки / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, Е.П. Молчанов Опубл. БИ 1988, N 47.

43. А.с. N 1373492 В23 С3/00 Способ обработки нежестких деталей / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, А.Н. Гуськов. Опубл. БИ 1988, N 6.

44. А.с. N 1468681 В23 С3/00 Способ фрезерования / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик. Опубл. БИ 1989, N 12.

45. А.с. N 1613307 В23 С3/00 Способ механической обработки деталей несколькими переходами / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, Г.В. Беднов. Опубл. БИ 1990, N 46.

46. А.с. N 1743701 В23 В1/00 Способ резания с нагревом материала срезаемого слоя / Т.В. Кухтик, В.И. Карлий, Е.П. Молчанов, В.С. Кухтик. Опубл. БИ 1992, N 24.

47. Положительное решение по заявке N 4902033/08/004815 Способ электромагнитной обработки / Т.В. Кухтик, Е.П. Молчанов, В.С. Кухтик.

48. А.с. N 1832606 В23 В1/00 Способ электромеханической обработки / Е.П. Молчанов, Т.В. Кухтик, В.С. Кухтик.

Т.В. Кухтик Опубл. БИ 1992, № 24.

49. Патент России № 1296361 В23 С5/06 Торцовая фреза / В.Ф. Нагайцев, Б.И. Остафьев, Н.В. Нагайцев, В.В. Ключко, Т.В. Кухтик

50. Патент России № 5003637/08 В23 С1/00 Способ резьбо-нарезания / В.Ф. Нагайцев, П.Б. Нагайцев, А.Н. Сидорев, Т.В. Кухтик.

51. А.с. № 1796428 В24 В39/00 Устройство для упрочняющей обработки / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, Ю.И. Каплай, Н.И. Удод, О.В. Мирошников. Опубл. БИ 1991, № 7.

52. А.с. № 1298052 В23 С3/00 Способ механической обработки деталей / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, О.С. Шишкевич, И.В. Кобцева. Опубл. БИ 1991, № 8.

53. А.с. № 1774227 G01 N3/58 Способ определения состояния образца после обработки / Т.В. Кухтик, В.А. Овчаренко, В.С. Кухтик, С.П. Гинкул, В.В. Исасв, С.Г. Онищук. Опубл. БИ 1990, № 24.

54. А.с. № 1814255 В23 В1/00 Способ механической обработки деталей / Т.В. Кухтик, С.П. Гинкул, В.С. Кухтик, Е.П. Молчанов. Опубл. БИ 1992, № 20.

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is mostly mirrored and difficult to decipher.

AB 30.867

AB 30.867