

## РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ МОДЕЛІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ З ПОЗИЦІЇ МЕХАНІКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКОВУВАННЯ

<sup>1</sup>Я. М. Кусий\*, <sup>2</sup>О. В. Личак, <sup>3</sup>О. Р. Онисько

<sup>1</sup> Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12,  
e-mail: jarkym@ukr.net

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5,  
e-mail: olehlychak2003@yahoo.com

<sup>3</sup> ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: onysko.oleg@gmail.com

Встановлено пріоритетність підвищення якості деталей машин, забезпечення їх експлуатаційних характеристик та заданих показників надійності при проектуванні нафтогазовидобувного та машинобудівного обладнання. Відзначено домінуючість критерію технологічного успадкування для усіх стадій життєвого циклу виробу. Проаналізовано сучасний стан забезпечення параметрів якості деталі та її експлуатаційних характеристик з позиції технологічного успадкування. Розглянуто алгоритми технологічного забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів. Описано підходи для оцінки ступеня деградації матеріалу, відпрацьованого та прогнозованого (залишкового) ресурсу виробів. Встановлено об'єкт, предмет і задачі досліджень. Представлено деформаційні та енергетичні критерії для оцінки пошкоджуваності матеріалів. Описано специфіку SADT-технології для аналізу та синтезу технологічних процесів, відзначено переваги, недоліки та область її застосування. Запропоновано системний підхід при сумісному використанні механіки суцільних середовищ, континуальної механіки пошкодження, механіки руйнування. При дослідженні процесу пластичної формозміни металу в певному вогнищі деформації, властивості поверхневого шару розглядаються як результат цієї пластичної формозміни, а процес експлуатації – як процес продовження зміни цих властивостей. Такий підхід дозволяє використовувати для аналізу фізичних явищ параметри механіки деформування – ступінь деформації зсуву  $\Delta$  і ступінь вичерпання запасу пластичності  $\psi$ . Проаналізовано життєвий цикл виробу як єдиний процес вичерпання запасу пластичності металу під впливом заданих програм навантаження згідно технологічного успадкування властивостей. Запропоновано удосконалену структурну модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування.

Ключові слова: технологічний процес; поверхневий шар; експлуатаційні характеристики; континуальна механіка пошкодження; спадковість.

Установлена приоритетность повышения качества деталей машин, обеспечения их эксплуатационных характеристик и заданных показателей надежности при проектировании нефтегазодобывающего, машиностроительного оборудования. Отмечена доминантность критерия технологического наследования на всех этапах и стадиях жизненного цикла изделия. Проанализировано современное состояние обеспечения параметров качества детали и ее эксплуатационных характеристик с позиции технологического наследования. Рассмотрены алгоритмы технологического обеспечения параметров качества, эксплуатационных характеристик и показателей надежности изделий. Описаны подходы к оценке степени деградации материала, отработанного и прогнозируемого (остаточного) ресурса изделий. Установлен объект, предмет и задачи исследований. Представлены деформационные и энергетические критерии для оценки повреждаемости материалов. Описана специфика SADT-технологии для анализа и синтеза технологических процессов, отмечены преимущества, недостатки и область ее применения. Предложен системный подход при совместном использовании механики сплошных сред, континуальной механики повреждения, механики разрушения. При исследовании процесса пластического формоизменения металла в определенном очаге деформации, свойства поверхностного слоя рассматриваются как результат этого пластического течения, а процесс эксплуатации – как процесс продолжения изменения этих свойств. Такой подход позволяет использовать для анализа физических явлений параметры механики деформирования – степень деформации сдвига  $\Delta$  и степень исчерпания запаса пластичности  $\psi$ . Проанализирован жизненный цикл изделия как единый процесс исчерпания запаса пластичности металла под воздействием заданных программ нагрузки

согласно технологического наследования свойств. Предложена усовершенствованная структурная модель жизненного цикла изделия с позиции механики технологического наследования.

Ключевые слова: технологический процесс; поверхностный слой; эксплуатационные характеристики; континуальна механіка повреждения; наследственность.

*The priority of the quality improving of machine parts, providing their operational characteristics and specified reliability parameters during the design of oil and gas and mechanical engineering equipment was established. The dominance of the criterion of technological inheritability for all stages of the Life Cycle of a Part was noted. The current state of providing of the quality parameters of a part and its operational characteristics by means of the technological inheritability was analyzed. Algorithms for technological providing of quality parameters, operational characteristics and reliability indicators of parts are considered. Approaches for estimation of the degree of material degradation, worked-out and anticipated (residual) part lifetime were described. Object, subject and research tasks were installed. The deformation and energy criteria for evaluation of degree of material damageability are presented. The specificity of SADT-technology for the analysis and synthesis of the technological processes is described and the advantages, disadvantages, scope of its application are noted. A systematic approach for the joint using of continuum media mechanics, continuous damage mechanics and fracture mechanics is proposed. During the study of the process of metal plastic molding in a certain focus of deformation the properties of the surface layer are considered as a the result of this molding. And the process of part exploitation are considered as the continuing the change of these properties. That approach allows to use the parameters of the deformation mechanics as the degree of shear deformation  $\Lambda$  and the degree of exhaustion of the plasticity reserve  $\psi$  for the analysis of physical phenomena. The Life Cycle of a Part is analyzed as an integrated process of exhaustion of the metal plasticity stock under the influence of the specified load programs in according to the technological inheritability of its properties. An advanced structural model of the Life Cycle of a Part by means of the technological inheritability mechanics is offered.*

Keywords: technological process; surface layer; operating characteristics; continuum damage mechanics; inheritance.

### Вступ

Одним із пріоритетних завдань сучасних технологій виробництва обладнання для нафтогазовидобування, машинобудування та інших галузей промисловості є підвищення якості виробів, забезпечення їх експлуатаційних характеристик та заданих показників надійності. Вирішення цього завдання можливе за рахунок автоматизованого керування процесами та ретельного аналізу усього технологічного ланцюга виготовлення деталей і складання машин нафтогазовидобувного обладнання [1].

В переважній більшості випадків трансформація заготовок у деталі для нафтогазовидобувного, машинобудівного обладнання здійснюється за допомогою обробки різанням. Таким чином, якість деталі, що визначається заданими конструктивними параметрами, забезпечується сумарно умовами формування заготовок і обробкою різанням. При проектуванні технологічного обладнання та оснащення якість продукції визначається також її експлуатаційними характеристиками, що забезпечують службове призначення деталей і машин [2].

Для покращання експлуатаційних характеристик виробів (зносостійкості, втомної міцності тощо) та забезпечення необхідних геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару широко застосовують викінчуально-зміцнювальні технологічні операції [3].

### Аналіз літературних джерел

При проектуванні технологічних процесів механічної обробки деталей важливо разом із визначенням граничних значень величин відхилень заданих параметрів встановити фізичну природу їх виникнення та наступного розвитку. Тому доцільним є аналіз процесу виготовлення та експлуатації виробу у часі із позиції технологічного успадковування. Технологічним успадковуванням називають процес перенесення властивостей об'єкту від попередніх технологічних операцій до наступних. Збереження цих властивостей у об'єкті називають технологічною спадковістю. Технологічне успадковування призводить до накопичення у матеріалі деталей і їх поверхневих шарах певної спадковості, котру можна оцінити у вигляді множини показників якості [1, 2]. Процесом технологічного успадковування можна керувати з метою збереження позитивних властивостей (параметрів, показників) виробу та своєчасної ліквідації чи запобігання негативних впливів технологічного процесу (ТП). На сучасному етапі розвитку технології нафтогазовидобування та машинобудування здійснюється детальний і комплексний аналіз умов виробництва із встановленням кількісних оцінок технологічного успадковування. Явища технологічного успадковування пояснюють еволюцію властивостей виробів нафтогазовидобувної, машинобудівної та інших галузей промисловості у процесі їх виго-

товлення та експлуатації. У практиці підприємств властивості деталей машин, що знижують їх якість, потрібно ліквідувати на заготівельних або перших операціях ТП, а властивості, що забезпечують підвищення якості, навпаки – зберігати та розвивати [1, 2]. Дослідження технологічного успадковування при виготовленні виробів здійснюється у двох напрямках [1, 2].

Перший напрямок стосується розроблення математичних моделей поведінки матеріалу із статистичним опрацюванням результатів та застосуванням різноманітних середовищ/систем для моделювання структури ТП відповідно до заданих умов виготовлення і експлуатації виробу.

Другий напрямок стосується дослідження фізичної суті процесів, що відбуваються під час виготовлення деталей і машин, оскільки розв'язання проблеми якості виробів ґрунтуються на дослідженні фізичних причин їх відмов під час експлуатації та пов'язані з розвитком дослідницького апарату, здатного поєднати всю складну еволюцію умов і наслідків, що формують відмову. Найефективнішим напрямком досліджень слід вважати поєднання цих двох напрямків для формування єдиного системного підходу до вирішення питання технологічного успадковування.

Технологічний процес виготовлення деталей, складання машин та їх контроль повинні із мінімальними витратами часу та матеріальних ресурсів забезпечувати задані вимоги нормативно-технічної документації. Безпосередні зв'язки між параметрами технологічного процесу, параметрами якості виготовлення виробу, його експлуатаційними характеристиками та показниками надійності складні та важко реалізовані (рис. 1) [4]. Технологія виготовлення має пріоритетне значення у формуванні технічних вимог до ТП і експлуатаційних характеристик готової продукції. В задачі технології входять [3-5]:

- а) вибір матеріалів і проектування заготовки із заданими властивостями;
- б) розроблення технології виготовлення деталі необхідної форми та належної точності;
- в) забезпечення експлуатаційних характеристик шляхом зміцнення робочих поверхонь деталей;
- г) складання деталей в агрегати та їх випробування.

Відомо [16], що властивості поверхневого шару забезпечують переважну більшість експлуатаційних характеристик механічних деталей. Розглянемо існуючі напрямки досліджен-

ня та технологічного забезпечення якості машинобудівної продукції (рис. 1). Традиційним є підхід, що встановлює зв'язок параметрів ТП (структури операцій, режимів оброблення, методів контролю тощо) з експлуатаційними характеристиками оброблюваних виробів (шлях 1-4→5←6) (рис 1). Недоліком такого підходу є прив'язка до конкретних умов експлуатації, при зміні яких потрібно здійснити новий цикл трудомістких досліджень [5]. Більш загальним є забезпечення експлуатаційних характеристик оброблюваних виробів у дві стадії [5]:

– встановлення зв'язку технологічних характеристик із параметрами стану поверхні (шлях 1-3);

– встановлення впливу зазначених параметрів на експлуатаційні характеристики деталей машин (шлях 3-4→5←6).

Однак описані напрямки досліджень мають суттєвий недолік, а саме емпіричний шлях вирішення задачі, що вимагає значної трудомісткості експериментальних досліджень та характеризується невисокою точністю їх визначення. Емпіричний шлях вирішення завдання ускладнює моделювання технології механічної обробки деталей з оптимізацією параметрів стану їх поверхневого шару для забезпечення раціональних експлуатаційних характеристик [5].

Ефективнішим є підхід до технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик виробів, що базується на дослідженні внутрішніх закономірностей процесу формування параметрів поверхневого шару у вогнищі деформації (шляхи 1-2 і 2-3). Розкриття таких закономірностей сприятиме ґрунтовнішим дослідженням впливу параметрів поверхневого шару на процес руйнування деталі (3-4) та забезпечення експлуатаційних показників (4→5←6) [5].

Підвищення вимог до параметрів якості та експлуатаційних характеристик деталей та машин вимагають надійної оцінки, діагностики відпрацьованого та прогнозу залишкового ресурсу. Як правило, умови експлуатації механічних виробів характеризуються багатопараметричними нестационарними термосиловими впливами, взаємодією із технологічним середовищем, що призводять до розвитку різних механізмів деградації початкових властивостей міцності матеріалів конструкційних елементів і, в кінцевому підсумку, вичерпання ресурсу конструктивних вузлів об'єкта [7-8].

Процеси вичерпання ресурсу є багатостадійними, нелінійними, взаємопов'язаними та залежними від конкретних умов виготовлення та експлуатації індивідуального об'єкта.

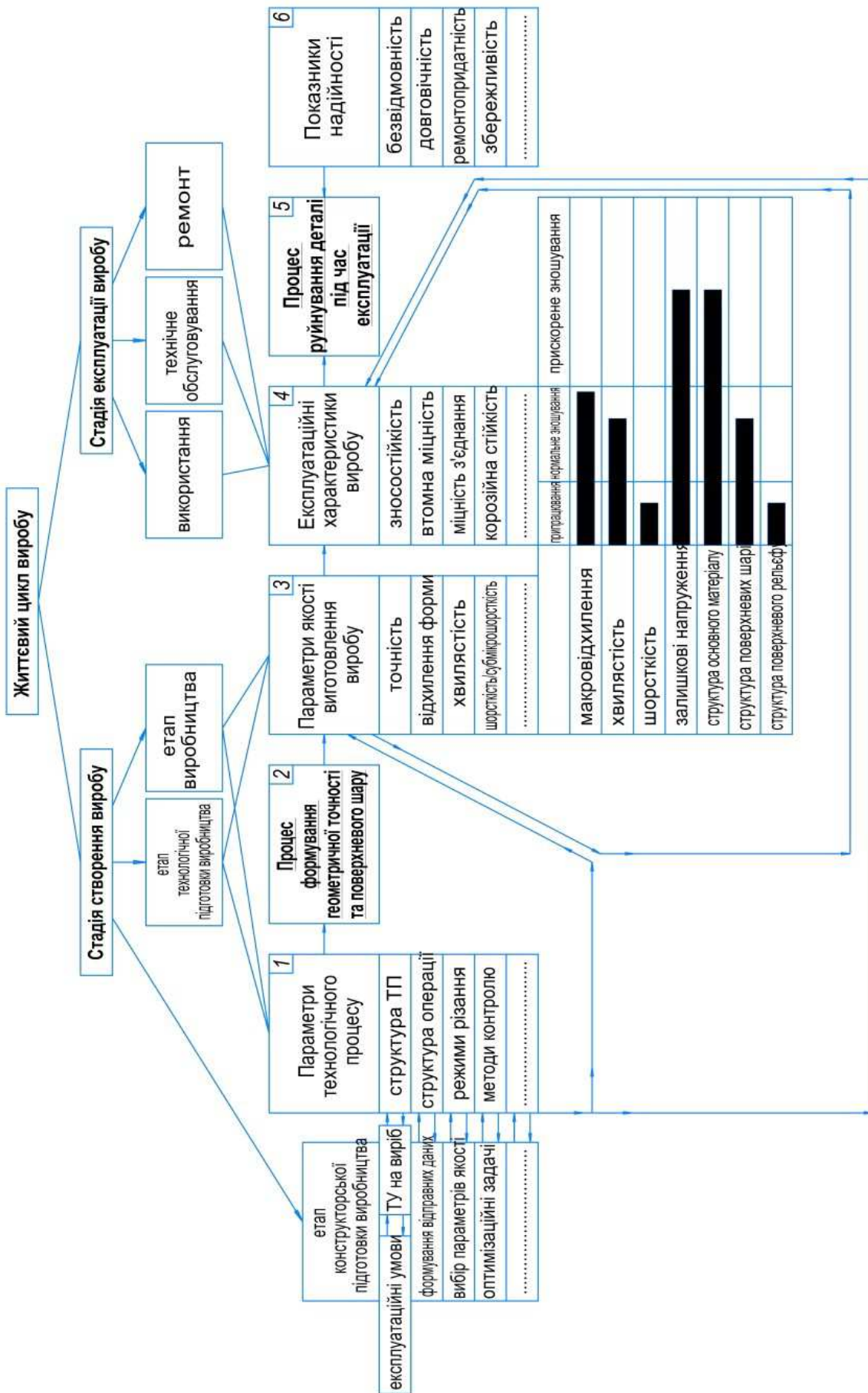


Рисунок 1 – Алгоритми технологічного забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів

В принципі, усі виготовлені деталі чи конструкції містять ті або інші зародки дефектів. Процеси розвитку та розповсюдження дефектів повинні бути обмежені за допомогою контролю за процесом руйнування. Для забезпечення надійності конструкції з дефектами необхідно, щоб пошкодження можна було виявити раніше, перш ніж воно досягло небезпечного розміру протягом усього розрахункового терміну служби. Залишкова міцність конструкції об'єктивно зменшується з деякою швидкістю внаслідок розвитку пошкожденості в процесі її експлуатації [7-8].

У нафтогазовидобувній і машинобудівній практиці реалізуються різні підходи для оцінки ступеня деградації матеріалу, оцінки відпрацьованого та прогнозу залишкового ресурсу. Інтенсивно розвиваються методи експериментальних досліджень, зокрема фізичні та експлуатаційні способи діагностування стану матеріалу об'єкту (методи акустичної емісії, діагностування стану за ступенем віброакустичних характеристик тощо) та математичним моделюванням поведінки об'єкта з використанням сучасних досягнень в області механіки, обчислювальної математики і засобів електронно-обчислювальної техніки [7]. Найперспективнішим є математичне моделювання механічних виробів з урахуванням особливостей їх конструктивної будови, експлуатаційних умов, формування структурно-напруженого стану та пошкожденості в матеріалі об'єкту і взаємного впливу цих ефектів. Основні проблеми при математичному моделюванні розвитку процесів пошкодження на базі континуальної механіки пошкодження (КМП) полягають в наступному.

Неможливо достатньо точно описати всі стадії руйнування матеріалу – від зародження мікрodefектів до досягнення макроскопічним пошкодженням (наприклад тріщиною) певного критичного розміру в рамках одного підходу. Пошкодження формуються як на субмікроскопічному рівні – об'єми від  $10^{-30}$  м<sup>3</sup> (елементарні акти руйнування на рівні атомної решітки), так і на мікро- та макроскопічному рівнях – до  $10^{-3}$  м<sup>3</sup> (конструктивні елементи) унаслідок певних багатостадійних процесів. Значні труднощі викликає опис процесів на мезорівні за умови пріоритетності фізичних закономірностей колективної взаємодії та еволюції різних складових ієрархічної структури конструкційного матеріалу [7-9].

З точки зору механіки суцільних середовищ (МСС), стадія розвитку розподілених мікрodefектів описується КМП, а стадія поширення небезпечної мікротріщини — механікою

руйнування (МР). Гомогенізація мікрodefектів в КМП має суперечливий характер в перехідній зоні при їх розмірі  $\sim 0,1$  мм [7]. В цій зоні неможливе застосування МР, оскільки тріщини недостатньо визначені, а можливості КМП вичерпані. Отже, для адекватного моделювання процесу накопичення пошкоджень в цій зоні необхідно зближення меж дії КМП і МР. Це можна зробити шляхом введення для процесу накопичення розподілених мікрodefектів двох стадій: стадії зародження мікрodefектів і стадії поширення їх (взаємодії), що закінчується утворенням макроскопічної тріщини певних розмірів [7-8]. Введення цих стадій дозволяє розширити область застосування КМП і у випадку дії механізмів втоми та повзучості, пояснити взаємодію цих механізмів і явища нелінійного сумування пошкоджень при зміні умов навантаження [8]. Проте, незважаючи на чисельні дослідження процесу руйнування металу, які необхідні для запобігання виникненню відмов виробів під час їх експлуатації, фізична природа цього явища з'ясована не повністю [9].

Складність адекватного врахування усіх факторів при розробленні методики наскрізного автоматизованого проектування прогресивного ТП на базі принципів механіки технологічного успадкування вимагає створення нормованих розрахункових процедур із застосуванням положень феноменологічної теорії. Це вимагає структурно-інформаційної інтеграції значного обсягу технологічної інформації при використанні сучасних CALS-технологій, що описують концепцію та ідеологію PLM (Product Lifecycle Management). Тому для ефективного вирішення поставлених технічних завдань із застосуванням моделі виробу і його життєвого циклу використана методологія структурного аналізу SADT (Structural Analysis and Design Technology) із розробленням комплексу функціональних моделей, моделей процесів і моделей станів поверхневого шару [10-13].

**Метою даного дослідження** є удосконалення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування.

Життєвий цикл виробу від розроблення конструкції виробу до його відмови в процесі експлуатації служить об'єктом дослідження у даній статті.

**Предметом цього дослідження** є розроблення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування шляхом контролю параметрів повер-

хневого шару виробу на етапах і стадіях технологічного процесу.

**Задачі досліджень** містять:

1) оцінку деформаційних і енергетичних критеріїв для оцінки пошкоджуваності матеріалів;

2) аналіз механізму формування та перетворення властивостей поверхневого шару виробу відповідно до його життєвого циклу в рамках механіки технологічного успадкування;

3) дослідження технологічного успадкування виробничих процесів заготівельного виробництва;

4) удосконалення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування.

### **Формування та перетворення властивостей поверхневого шару в рамках механіки технологічного успадкування**

#### **Теоретичні положення**

*Аналіз деформаційних критеріїв для оцінки пошкоджуваності матеріалів*

На даному етапі розвитку науки і техніки інтенсивно розвивається континуальна механіка пошкодження (КМП), основні гіпотези якої запропоновані Л. М. Качановим та Ю. М. Работновим [8]. На сьогодні немає однаковості у позначенні основних параметрів КМП. Зокрема, Л. М. Качанов описав стан пошкодження в результаті розвитку мікроскопічних порожнин в матеріалі в процесі повзучості скалярною змінною – «суцільністю»  $\psi$  ( $0 \leq \psi \leq 1$ ), де  $\psi = 1$  і  $\psi = 0$  означає відповідно початковий непошкоджений стан і кінцево повністю пошкоджений стан. Пізніше Ю. М. Работнов модифікував теорію Качанова шляхом введення альтернативної змінної – «пошкоженості»  $\omega = 1 - \psi$  ( $0 \leq \omega \leq 1$ ), що служить для оцінки деградації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів [8]. В. Л. Колмогоров запропонував використати в теорії руйнування поняття «ступеня використання ресурсу пластичності металу  $\psi$ ». Величина  $\psi$  до деформації дорівнює нулю, а в момент макроруйнування – одиниці і характеризує пошкодження металу, накопичене при пластичній деформації [9, 14]. В.В. Новожилов ввів поняття пластичного деформування, величина якого визначається залишковою зміною елементарного об'єму в процесі пластичної деформації і чисельно дорівнює згортці тензора кінцевої деформації  $\varepsilon_i$  [9]. С. Мураками запропонував замість позначення пошкоджено-

сті  $\omega$  змінну  $D$ , що відповідає трактуванню терміну damageability/damage – «пошкоджуваність/пошкоджуваність» [15]. Для оцінки розвитку дефектів під час виготовлення виробів і пошкоджень під час їх експлуатації також застосовують деформаційні та енергетичні критерії.

Розробленню деформаційних критеріїв присвячені роботи С.І. Губкіна, М. А. Зайкова, В.М. Перетятко, Г. О. Смірнова-Аляєва, В.М. Розенберга, О. О. Преснякова, Ю. М. Чижикова, М.Я. Дзугутова, Г.Д. Деля, В.А. Огороднікова та інших науковців. Зокрема, С.І. Губкін, запропонував визначати величину середньої пластичності  $\Pi$  як середньоарифметичне парних одиничних показників пластичності  $\delta_i$ , після чого середню пластичність металу аналізують залежно від хімічного складу, структури, температури та швидкості деформації, масштабного фактора тощо. М. А. Зайковим та В.М. Перетятко ввели інваріантну характеристику – октаедричний зсув  $g_{OKT}$  і показник напруженого стану  $n$ , що визначається відношенням максимального головного напруження до опору одноосної деформації. М.А.Зайков і В.Н. Перетятко прийшли до висновку, що для сталей існує «універсальний» критерій пластичності  $\Pi_0$  у вигляді відношення октаедричного зсуву  $g_{OKT}$  до показника напруженого стану  $n$  [9].

Оцінка деформованості за Р. А. Смирновим-Аляєвим і В. М. Розенбергом базується на зіставленні накопиченої інтенсивності пластичної деформації  $\varepsilon_i$ , яку елементарна частинка зазнала в процесі формозміни, з критичною інтенсивністю деформації  $\varepsilon_p$ , визначеної за діаграмою пластичності для показника напруженого стану, характерного для даної частинки [9]:

$$\varepsilon_i < \varepsilon_p(\Pi), \quad (1)$$

де  $\Pi$  – певний показник напруженого стану, характерний для розглянутої частки металу. Вивченню впливу характеру зміни показника напруженого стану в процесі деформації (історії навантаження) на пластичність металу були присвячені експериментальні дослідження, проведені Г. Д. Делем та В. А. Огородніковим [9]. Г. Д. Дель і В. А. Огородніков після різних програм зі складною історією навантаження визначали відношення

$$B(\tau) = \varepsilon_p(\Pi = var) / \varepsilon_p(\Pi = const),$$

в якому  $\varepsilon_p(\Pi = var)$  – пластичність металу при складному навантаженні, а  $\varepsilon_p(\Pi = const)$  – значення, передбачене діаграмою пластичності при показнику напруженого стану, який мав місце в момент руйнування при складному на-

вантаженні. Авторам вдалося знайти апроксимацію у вигляді [9]:

$$B(\tau) = \left( 1 + 0,2 \cdot \frac{d\Pi}{d\varepsilon_i} \right) \frac{\varepsilon_i^{0,2d\Pi/d\varepsilon_i}}{\varepsilon_p^{1+0,2d\Pi/d\varepsilon_i}}, \quad (2)$$

або

$$B(\tau) = \exp(0,2d\Pi/d\varepsilon_i). \quad (3)$$

*Аналіз енергетичних критеріїв для оцінки пошкоджуваності матеріалів*

Крім деформаційних, при аналізі процесів ОМТ використовують енергетичні критерії руйнування. Відповідно до Л. Р. Степанського [9] робота пластичної деформації елементарного об'єму не повинна перевищувати деяке критичне значення, яке для металу з ідеально пластичними властивостями можна визначити як

$$[A] = \frac{\sigma_s \psi (2 - \psi)}{\sqrt{3}(1 - \psi)}, \quad (4)$$

де  $\psi$  – поперечне звуження зразка при розтягу, залежне від гідростатичного тиску. Для ідеально пластичного матеріалу, що піддається пластичній деформації, енергетичний критерій еквівалентний деформаційному.

М. Кокрофт і Д.Латам пов'язують виникнення макроскопічної тріщини з досягненням роботою пластичної деформації на напрямку максимального напруження розтягу свого критичного значення  $\sigma_*$ , тобто  $\int_0^{\varepsilon_f} \sigma_* d\varepsilon = C$ , де  $C$  –

константа.

Л.Д.Соколов та В.А.Скуднов [8] визначили критичне значення показника напруженого стану, при якому настає крихке руйнування металу:

$$P_{кр} = \sqrt{\frac{1 - \frac{Q_{прих.}}{Q_T}}{C_1}}, \quad (5)$$

де  $\frac{Q_{прих.}}{Q_T}$  – відношення прихованої енергії, що залишилася в металі у вигляді енергії наклепу, до зовнішньої частини роботи, яка перетворилася у тепло;

$$C_1 = \frac{0,5(1 - 2\nu)}{(1 + \nu)} - \text{пружна постійна, що за-}$$

лежить від коефіцієнта Пуассона  $\nu$ .

Оцінюючи енергетичні критерії руйнування загалом, відзначимо, що вони поки що не знайшли широкого застосування для вивчення процесу руйнування металу.

### *Основи структурного аналізу та синтезу технологічних процесів*

Інформаційні технології підтримки життєвого циклу виробу дозволяють ефективно використовувати інструментарій аналізу та синтезу технологічних процесів, зокрема SADT-технології [10-13, 16]. Основними перевагами SADT-технологій [10, 16] порівняно з іншими підходами до вирішення складних завдань структурного аналізу та синтезу для подальшого моделювання, які зумовили вибір її як основного засобу при вирішенні даної задачі, є:

1) жорстка формалізація власне процесу проектування, а також опрацювання та оформлення результатів, що забезпечує зручність отримання, сприйняття й аналізу моделей, простоту інтегрування моделей різних рівнів або моделей отриманих чи наданих різними розробниками;

2) задовільний компроміс між наочністю моделей та їх інформативністю;

3) наявність системи редагування та корекції, що дозволяє зручне коригування на різних рівнях ієрархії діаграм, так і врахування корекцій на взаємопов'язаних з коригованим елементом діаграми рівнях моделі;

4) суттєві зручності формування діаграм, які забезпечують графічні можливості при утворенні блоків із використанням сучасного програмного забезпечення та автоматичного представлення графічної інформації відповідно до вимог технології.

Однією з найважливіших особливостей застосування SADT-технології при розв'язанні розгляданого класу задач є можливість, з одного боку, розроблення з її допомогою технологій проектування технологічних процесів, а, з іншого, – використання одержаних результатів для проектування технологічних процесів виготовлення деталі. У найбільш узагальненому формулюванні призначенням отриманої з використанням SADT-підходу технології є проектування багатofакторних технологічних операцій, що оптимізуються за великою кількістю параметрів якості [16]. Метод SADT, поряд з іншими універсальними методами, лише рекомендує, як організувати та проводити процес аналізу з оформленням результатів його опрацювання, але не дає жодних рекомендацій стосовно способів розбиття/відокремлення об'єкта на частини. Ця специфіка тісно пов'язана з особливостями кожної предметної області та вимагає ґрунтового знання не лише методології SADT, але і суті розглядуваної проблеми. Для предметної області повинні розроблятися конкретні рекомендації, що скорочують обсяг твор-

чої роботи із одночасним підвищенням продуктивності праці при проектуванні системи або її аналізі на етапі ТПВ [10, 16].

**Аналіз механізму формування та перетворення властивостей поверхневого шару виробу відповідно до його життєвого циклу в рамках механіки технологічного успадкування**

Технологічне успадкування при виготовленні виробів розглядається як сукупність складних явищ переносу множини залежних один від одного параметрів якості деталі від попередніх до наступних технологічних операцій. Однак технологічне успадкування доцільно описати не простими одновимірними моделями, а складнішими моделями у вигляді функціоналів. Розробка системи функціоналів як математичних моделей технологічного успадкування вимагає опису фізичних явищ при формуванні поверхневого шару виробів [1, 2, 16]. Життєвий цикл виробу (ЖЦВ) розглядають як єдиний процес вичерпання наявного запасу пластичності металу під впливом заданих програм навантаження згідно технологічного успадкування властивостей виробу на етапах і стадіях ЖЦВ [16].

Незважаючи на складність протікання процесів в поверхневому шарі механічно оброблених виробів, сучасна наука дозволяє описати їх при спільному використанні МСС, КМП і МР на усіх рівнях досліджень. Основні процеси у життєвому циклі виробу: різання, ППД, експлуатацію можна розглядати як поступову пружно-пластичну формозміну матеріалу. Тому відповідно до підходу КМП при дослідженні процесу пластичної формозміни металу в певному вогнищі деформації, властивості поверхневого шару розглядаються як результат цієї пластичної формозміни, а процес експлуатації – як процес продовження зміни цих властивостей. У зв'язку з таким підходом поряд з традиційними параметрами стану поверхневого шару, такими як шорсткість, хвилястість, твердість, залишкові напруження, використовуються відомі з механіки деформування параметри, такі як ступінь деформації зсуву  $\Lambda$  і ступінь вичерпання запасу пластичності  $\psi$  [5, 16].

При застосуванні методології SADT можна представити структурну модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування (рис. 2) [10, 16]. За відповідний параметр прийнято стан поверхневого шару заготовки (СПШО) виробу, що транспортують на першу операцію механічного оброблення – стадію різання. Цей стан описується сукупніс-

тю параметрів напружено-деформованого стану поверхневого шару металу – ступенем деформації зсуву  $\Lambda$ , ступенем вичерпання запасу пластичності  $\psi$ , тензором залишкових напружень  $[T\sigma_{зал.}]$  і традиційними геометричними та фізико-механічними параметрами. Множиною вихідних параметрів служить стан поверхневого шару після визначеного виду експлуатаційного навантаження, що описується тією ж сукупністю параметрів, що і відправна характеристика, залежно від технічних вимог до деталі [10-13, 16].

Керуючим фактором служить історія навантаження (ІН), а механізмом виконання функції – програма навантаження (ПН), представлені в категоріях і термінах механіки технологічного успадкування. Отримання інформації щодо умов формування вогнищ деформації (ВД), початкових і граничних умовах задач механіки, тощо забезпечується шляхом запиту до відповідної бази даних технологічного успадкування (БДТУ) з метою реалізації програм навантаження [16]. Відправними параметрами при цьому є: крива зміцнення  $\sigma_i = \sigma_i(e_i)$ , крива граничної пластичності  $A_p = A_p(II)$ , діаграма циклічної тріщиностійкості  $V_{тр} = V_{тр}(K)$ .

Припущення, використані при побудові класичної функціональної моделі механіки технологічного успадкування: в початковому стані металу заготовки ступінь деформації зсуву  $\Lambda_{\Sigma}=0$ , ступінь вичерпання запасів пластичності  $\psi_{\Sigma}=0$  та тензор залишкових напружень  $[T\sigma_{зал.}] = 0$ .

Інтенсивність швидкостей деформації зсуву  $H$  визначають за формулою [5]:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left\{ (\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 - (\xi_z - \xi_x)^2 + \frac{3}{2} \cdot (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{xz}^2) \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

де  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$  – швидкості відносних видовжень;  
 $\eta_{xy}, \eta_{yz}, \eta_{xz}$  – швидкості відносних зсувів визначеного елементарного об'єму. Величина, що характеризує накопичену частину деформації за період часу  $t_0-t_1$ , називається ступенем деформації зсуву  $\Lambda$  [5]:

$$\Lambda = \int_{t_0}^{t_1} H dt. \quad (7)$$

Феноменологічна теорія руйнування металу дає кількісну оцінку пошкоджуваності поверхневого шару при пластичній деформації. Зокрема, найпростіша модель, що описує процес руйнування частинки металу за рахунок ступеня вичерпання запасів пластичності  $\psi$ , має вигляд [5, 8]:



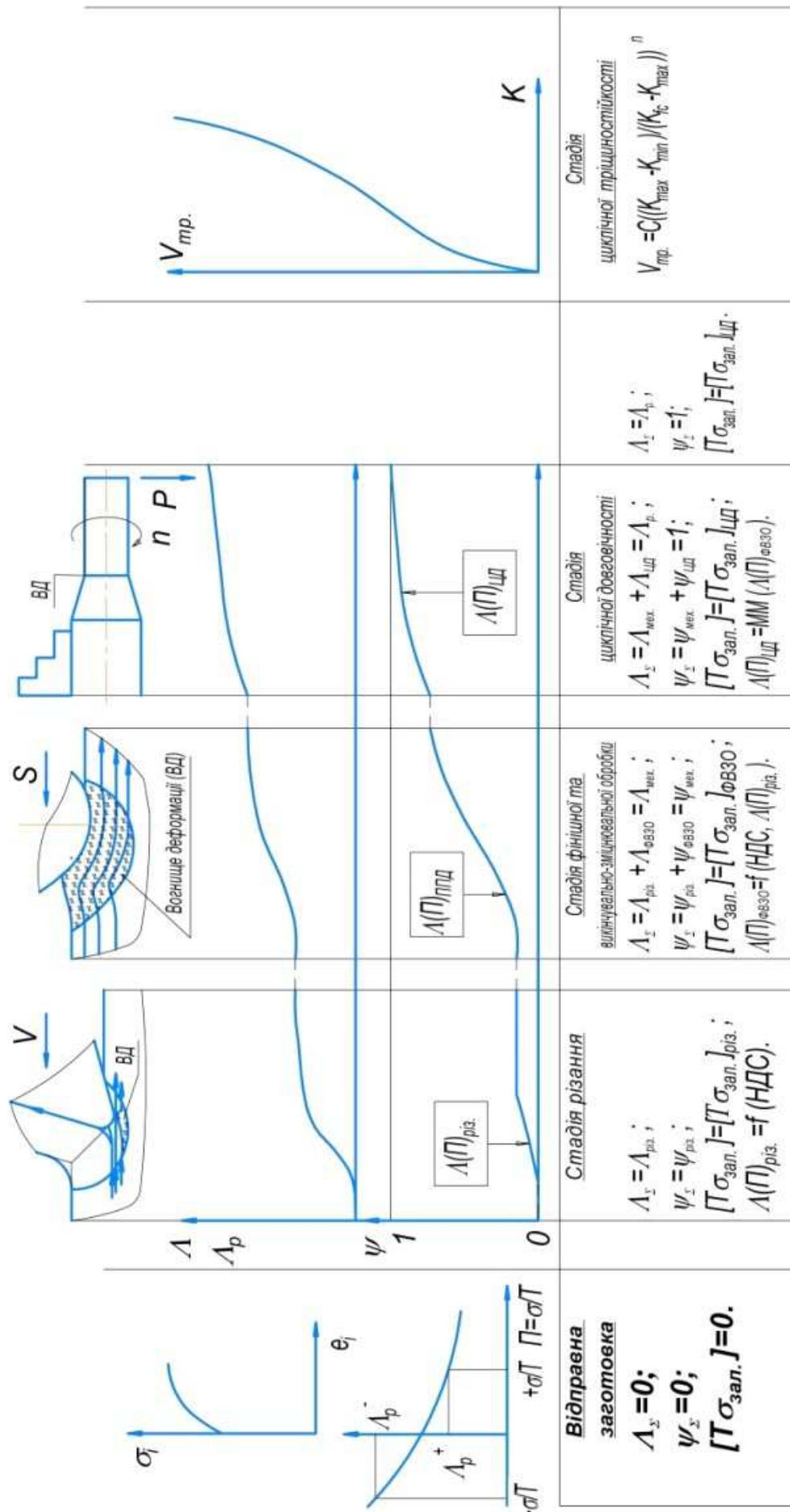


Рисунок 2 – Класична структурна модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного усадковування А0 рівня (батьківський блок)

$$\psi = \int_0^A \frac{dA}{A_p(\Pi)}, \quad (8)$$

де  $\psi$  – ступінь вичерпання ресурсу пластичності;

$A_p$  – ступінь деформації зсуву, накопичена металом до моменту руйнування;

$\Pi$  – показник схеми напруженого стану.

$$\Pi = \frac{\sigma}{T}, \quad (9)$$

де  $\sigma$  – середнє навантаження або гідростатичний тиск (з протилежним знаком);

$T$  – інтенсивність дотичних напружень.

### Дослідження технологічного успадкування виробничих процесів заготівельного виробництва

Сучасний виробничий процес отримання заготовок на основі заліза та його сплавів є замкнутим циклом різних стадій технологічного процесу: виплавляння сировини із руди; виготовлення сталі/чавуну, переробка злитків у прокатну продукцію. Самоціллю сучасного металургійного виробництва є не висока продуктивність, а висока якість заготовок. Забезпечення якості продукції повинно здійснюватися системно – на всіх етапах і стадіях ТП. Дослідження закономірностей технологічного успадкування властивостей виробу під час виготовлення є важливим напрямком розвитку наукових досліджень. Аналізуючи процес виготовлення деталі чи механізму як сукупність різних взаємозв'язків із технологічним середовищем, можна встановити, що призначення раціональних режимів оброблення для кожної наступної технологічної операції залежить від властивостей заготовки. Очевидно, що значна кількість властивостей виробів залежить від властивостей відправної шихти [1, 17].

Встановлено, що забезпечення показників надійності деталей та вузлів машин при механічному обробленні та складанні безпосередньо пов'язано не лише від технологічного, а і інших різновидів успадкування. Зокрема, практично не враховується важливість заготівельного виробництва, хоча лише 25 % властивостей шихти передається заготовці, а 75 % формується під час заливання та затверднення при охолодженні [4]. З огляду на технологічне успадкування, при передачі шкідливих властивостей матеріалів від попередніх до наступних операцій знижуються параметри якості машинобудівної продукції. Дефекти заготовок з металургійного виробництва можуть проявлятися під час механічної обробки у вигляді пор, раковин, тріщин тощо. При невчасному виявленні

браку: на фінішних операціях виправляти його дуже складно [1, 17].

Спадкова природа старіння матеріалів має суттєвий вплив на формування кінцевих параметрів якості продукції. При деформуванні заготовки на попередніх операціях з кінцевою швидкістю створюються передумови для нерівноважних станів і виникнення процесів повзучості у готовому виробі. Границі зерен також є джерелами дислокацій, причому механізм початку плинності визначається станом відправної дислокаційної структури металу. При слабкому закріпленні деформацій плинність починається внаслідок їх виривання. При сильному блокуванні дислокацій плинність має місце через множини нових дислокацій в місцях концентраторів напружень. Домішки в металі заготовок також є важливим фактором спадкового характеру старіння [17].

Коефіцієнт передачі при старінні визначають за формулою [17]:

$$k_4 = \frac{l}{s_0} = \frac{\sigma_0}{\sigma_0}, \quad (10)$$

де  $k_4$  – коефіцієнт передачі при старінні;

$s_0$  – коефіцієнт міжзеренної стійкості;

$\sigma_0$  – величина напруження в початковий період релаксації;

$\sigma'_0$  – величина умовного початкового напруження другого періоду релаксації.

Використовуючи перевірені досвідом технологічні прийоми, можна впливати на формування властивостей виробу, змінюючи структуру матеріалу. Отже, множина першорідних властивостей відправної шихти і взаємовплив технологічного середовища є основою для спрямованого формування бажаних властивостей у виробках нафтогазовидобувної, машинобудівної та інших галузей промисловості. Така системність є основою підходу керування параметрами якості продукції, що отримала застосування у реалізації технологічного успадкування, зокрема в технологіях генної інженерії в сплавах [1, 2, 17].

Згідно сучасних досліджень, рідкий сплав – це не однорідна суміш атомів, а мікронеоднорідна кластерна побудова, причому кластери – це зони з підвищеною концентрацією компоненти з домішками, що утворюють скупчення атомів у кристалічній решітці матриці твердого розчину [2]. Існує спадковий зв'язок між структурами рідких і твердих сплавів – розплави можуть існувати десятки годин у нерівноважному стані, зберігаючи елементи структури на нанорівні. Властивості розплаву визначаються властивостями хімічних елементів, що входять



Рисунок 3 – Дослідження технологічного успадкування на стадії заготівельного виробництва

до його складу, і є залежними від часових, температурних, фізичних параметрів оброблення [1, 17]. В проблемі загального аналізу технологій, конструкцій і матеріалів представляє значний інтерес неоднорідність структури, яка формується під час кристалізації сплавів залежно від умов тепловідведення. Елементами такої структури є первинні зерна, границі зерен, пори, раковини, утворення та властивості яких залежать від ліквідації компонентів сплавів. При проектуванні деталей розрахунок конструкційної міцності проводиться з позицій механіки суцільних середовищ без врахування технологічної дефектності металічного матеріалу та нерівномірного розподілу властивостей в макрооб'ємах. Тому потрібно провести дослідження формування спадкових властивостей у заготовках під час їх виготовлення на теоретичному та експериментальному рівнях (рис. 3).

На першому етапі досліджень аналізуються відправні дані конструкторської документації, фізико-механічні та технологічні властивості матеріалу деталі, кінцева точність та якість її виконавчих поверхонь, технічні вимоги на виготовлення деталей і складання машини тощо (рис. 3). Після аналізу відправних даних проводяться оптимізація ТП із застосуванням прикладних комп'ютерних програм та сучасними засобами імітаційно-реологічного моделювання. Після виготовлення заготовок здійснюють вибірковий контроль параметрів якості заготовки, зокрема, прогнозується ступінь їх пошкодженості методом LM-твердості.

#### Удосконалення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування

Удосконалена структурна модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування для дослідження формування та перетворення властивостей поверхневого шару наведена на рис. 4.

Прогресивний технологічний процес виготовлення виробу, орієнтований на підвищення довговічності деталей машин, складається з операцій чорнового, півчистового, чистового

оброблення різання і подальшої фінішної або викінчувально-зміцнювальної операції. Перша стадія – стадія заготівельного виробництва – характеризується формуванням просторової форми та геометричних розмірів заготовки в процесі литва, обробки тиском чи зварювання. В процесі виготовлення заготовки накопичується деформація за рахунок її напружено-деформованого стану  $A_{заг.}$ , формується початковий рівень пошкодженості матеріалу  $\psi_{заг.}$ , виникають залишкові напруження, які пов'язані із заготівельним виробництвом та описуються тензором  $[T\sigma_{зал.}]_{заг.}$ .

Друга стадія – стадія різання (чорнове, напівчистове, чистове оброблення). На ній здійснюються основні операції формоутворення поверхонь і забезпечується точність оброблення, ця стадія починається з початкових значень деформації  $A_{заг.}$  та показника вичерпання пластичності  $\psi_{заг.}$ . За два етапи квазімонотонної деформації додатково накопичуються деформація за рахунок напружено-деформованого стану  $A_{заг.} = A_{заг.} + A_{різ.}$ , зменшується запас пластичності  $\psi_{заг.} = \psi_{заг.} + \psi_{різ.}$  і формуються залишкові напруження, які описуються тензором  $[T\sigma_{зал.}]_{різ.}$ .

Стан поверхні після основної формотвірної обробки різанням є початковим для стадії фінішного та викінчувально-зміцнювального оброблення (ФВЗО). З точки зору формування, у поверхневому шарі виробу, сприятливих для умов експлуатації залишкових напружень стиску, доцільно кінцевими технологічними операціями прийняти такі, що реалізуються методами ППД. На стадії ФВЗО в процесі навантаження та формування вогнища пластичного деформування, знімаються залишкові напруження, отримані в процесі обробки різанням.

На третьому етапі квазімонотонної деформації відбувається накопичення деформації за рахунок напружено-деформованого стану  $A_{заг.} = A_{заг.} + A_{різ.} + A_{ФВЗО}$  і зменшення запасу пластичності  $\psi_{заг.} = \psi_{заг.} + \psi_{різ.} + \psi_{ФВЗО}$ , формуються залишкові напруження, які описуються тензором  $[T\sigma_{зал.}]_{ФВЗО}$ . Все це приводить до но-

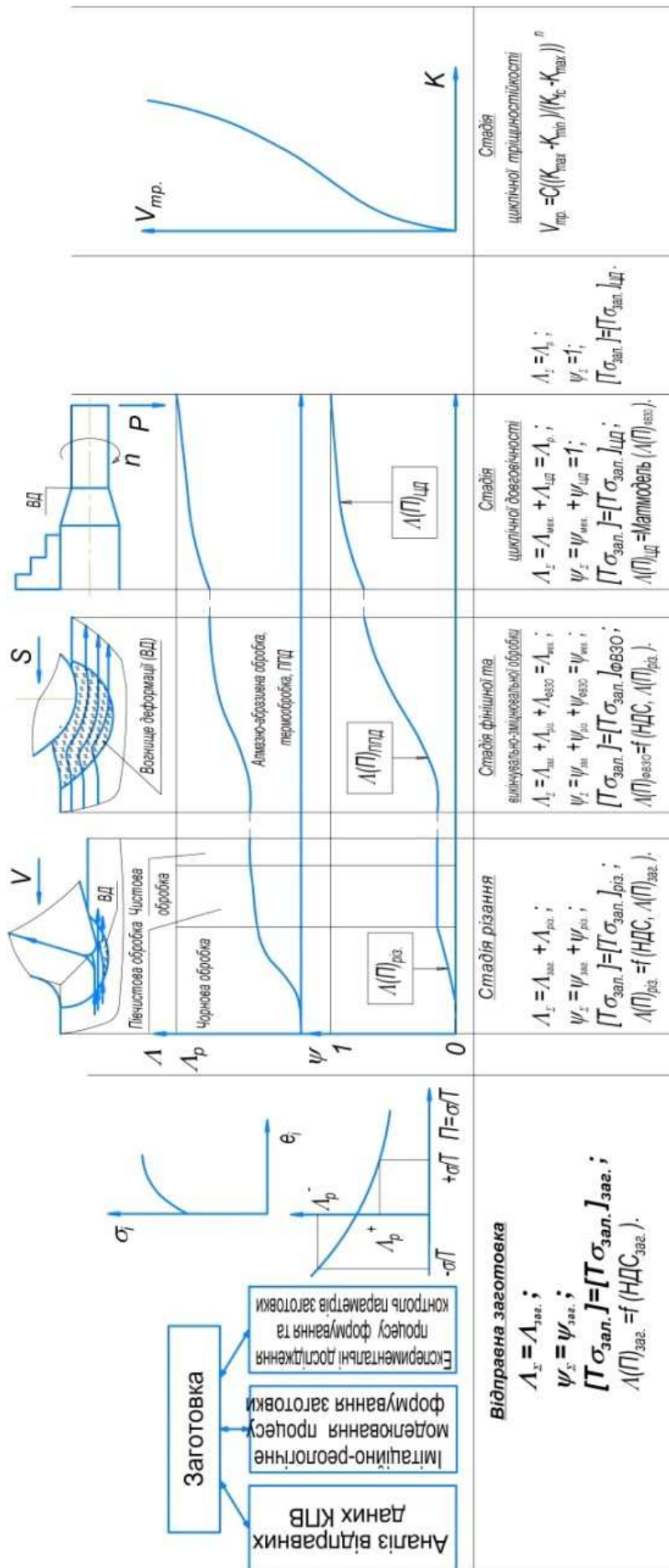


Рисунок 4 – Удосконалена структурна модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного усадкування

вого стану поверхні із визначеним ступенем деформації зсуву, визначеним рівнем залишкових напружень. Величина  $\psi_{ФВЗО}$  є пошкоджувальністю, накопиченою на стадії ФВЗО із врахуванням історії навантаження. Накопичене значення пошкоджувальності є сумою ступеня вичерпання запасу пластичності 1-4 стадій, тобто заготівельної стадії та стадій мехобробки. При цьому від сумарної накопиченої деформації залежить і залишковий напружений стан.

Стадія експлуатаційного втомного навантаження складається із етапів циклічної довговічності (ЦД) та циклічної тріщиностійкості. Початковий стан для стадії ЦД представлений величинами  $A_{мех.}$ ,  $\psi_{мех.}$ ,  $[T\sigma_{зал.}]_{ФВЗО}$ . Ця стадія характеризується подальшим накопиченням множини деформацій, що виникають у умовах спільного впливу тензорів втомних і залишкових напружень  $[T\sigma_{зал.}]_{ФВЗО}$ . Залишкові напруження стиску після обробки ВВЗ дають м'якші схеми навантаження втоми. Сума тензорів залишкових і втомних напружень формує тензор діючих напружень.

Процес багаточиклового втомного навантаження аналогічно до процесу різання характеризується програмами навантаження відповідно до кожного з етапів навантаження. В кожному циклі втомного навантаження мають місце накопичення ступеня деформації зсуву та часткова релаксація напружень, що призводять до зміни параметрів схеми; на кінець стадії циклічної довговічності рівним нулю є тензор залишкових напружень.

Під час етапу циклічної довговічності накопичується пошкоджувальність  $\psi_{ЦД}$  і деформація  $A_{ЦД}$ . За стадії та етапи заготівельного виробництва, різання, ППД і циклічного навантаження в процесі експлуатації накопичилася гранична деформація та відбулося повне вичерпання запасу пластичності у визначеній точці ймовірного руйнування матеріалу поверхневого шару виробу. Цей стан характеризується  $\psi=1$  при кількості циклів  $N_{ЦД}$ , в поверхневому шарі виникає видима тріщина.

На етапі циклічної тріщиностійкості розрізняють три етапи (ділянки), що визначаються різними швидкостями росту тріщини. З порогового коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_{th}$  починається розвиток видимої тріщини. Закінчується цей етап в'язким руйнуванням зразка, що відповідає критичному коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_{fc}$ . Закінчення стадії втомного навантаження характеризується повним розділенням виробу, що описується параметрами циклічної в'язкості руйнування.

## Висновки

Проведені дослідження дозволили сформулювати основні положення системного підходу до проблеми технологічного успадковування при механічному виробництві. При розробленні основних положень технологічного успадковування враховано механізм формування властивостей на усьому технологічному ланцюгу виготовлення виробу. Запропоновано новий підхід до оцінювання успадковування стану виконавчих поверхонь виробів із врахуванням основних положень механіки суцільних середовищ, континуальної механіки пошкодження та механіки руйнування відповідно до життєвого циклу деталей машин з математичним представленням основних закономірностей. Зокрема, враховано критично важливе перенесення властивостей від заготівельних операцій на операції механічної обробки різанням, термообробки і поверхневого пластичного деформування, аж до стадії експлуатації деталей. Удосконалена структурна модель життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадковування придатна для формування бажаних параметрів стану виконавчих поверхонь деталей машин. Основою для цих покращень є гіпотеза щодо безперервності накопичення деформацій із вичерпанням запасу пластичності від заготівельних операцій аж до стадії експлуатації деталей включно, що враховує відповідну історію навантаження поверхонь виробів.

## Література

1. Дальский А. М., Базров Б. М., Васильев А. С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: МАИ, 2000. 364 с.
2. Kheifetz M.L., Vasilyev A.S., Klimenko S.A. Technological Control of the Heredity of Operational Quality Parameters for Machine Parts. *Advanced Materials and Technologies*. 2019. No 2. P. 8–18. doi: 10.17277/amt.2019.02.pp.008-018.
3. Kusyi Ya.M., Kuk A.M. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Volume 1426. doi: 10.1088/1742-6596/1426/1/012034 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>
4. Kusyi Ya., Kuk A., Kostiuk O. Use of vibration technologies for ensuring quality parameters of products surfaces. *SIMTERM 2019: materials of 19th International Conference on*

Thermal Science and Engineering of Serbia. Sokobanja, Serbia. 2019. P. 794-800.

5. Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M, Kleptzov A. Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*. 2016. No 1698 (1). P. 2-7. doi: 10.1063/1.4937831

6. Blumenstein, V., Mahalov, V., Shirokolo-bova F. Finite Element Modeling of Strengthening Process by Means of Surface Plastic Deformation Using a Multiradius Tool. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017. No 253. P. 1-12. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012017.

7. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций: монография. Н. Новгород: Изд.-во Нижегородского государственного университета, 1999. 226 с.

8. Волков Ю.Г., Коротких Ю.Г. Уравнения вязкоупруго-пластических сред с повреждениями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 424 с.

9. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.

10. Марка Д., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. М.: Мета Технология, 1993. 240 с.

11. Illushko V., Abdul-Retha E., Sokolov A., Zaretskaya I., Dierks S., Marqués P. Modern Integrated Technology of Information Systems Design and Development: From *Programming to Project Management*. United Kingdom: Marques Aviation, 2016. 443 p.

12. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под общ. ред. М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова. Новополюцк: ПГУ, 2002. 268 с.

13. Denkena B., Mörke T., Krüger M., Schmidt J., Boujnah H., Meyer J., Gottwald P., Spitschan B., Winkens M. Development and first Applications of Gentelligent Components over their Life-Cycle. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014. Volume 7(2). P. 139-150. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.12.006

14. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушения. М.: Металлургия, 1970. 229 с.

15. Sumio Murakami. Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. *Springer*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012. 402 p. doi: 10.1007/978-94-007-2666-6

16. Альгин В. Б. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества

машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. Минск : Беларус. навука, 2010. 109 с.

17. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М. : Машиностроение, 1975. 223 с.

### References

1. Dalskij A.M., Bazrov B.M., Vasilev A.S. i dr. Tehnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitelnom proizvodstve [Technological inheritance in mechanical engineering industry]. MAI, Moscow, 2000, 364 p. [in Russian]. URL: <https://www.twirpx.com/file/1325967/>

2. Kheifetz, ML, Vasilyev, AS & Klimenko, SA. 2019, Technological Control of the Heredity of Operational Quality Parameters for Machine Parts. *Advanced Materials and Technologies*, no 2, P. 8–18. doi: 10.17277/amt.2019.02.pp.008-018. [http://journal.tstu.ru/images/2-2019/02\\_Kheifetz,%20Vasilyev,%20Klimenko.pdf](http://journal.tstu.ru/images/2-2019/02_Kheifetz,%20Vasilyev,%20Klimenko.pdf)

3. Kusyi, YaM & Kuk, AM 2020, Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1426. doi: 10.1088/1742-6596/1426/1/012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>

4. Kusyi Ya, Kuk A & Kostyuk O 2019, Use of vibration technologies for ensuring quality parameters of products surfaces. *SIMTERM 2019: materials of 19th International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia*, pp. 794-800. URL: <http://simterm.masfak.ni.ac.rs/index.php/en/>

5. Blumenstein, V, Rakhimyanov, K, Heifetz, M & Kleptzov, A. Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*, 2016, no 1698 (1), P. 2-7. doi: 10.1063/1.4937831. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4937831>

6. Blumenstein, V, Mahalov, V & Shirokolo-bova F 2017, Finite Element Modeling of Strengthening Process by Means of Surface Plastic Deformation Using a Multiradius Tool. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, no 253, P. 1-12. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012017. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/253/1/012017/pdf>

7. Kazakov, DA, Kapustin, SA & Korotkih, YuG 1999, Modelirovanie processvo deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstrukcij [Modeling of the processes of materials and structures deformation and fracture]. Izd.-vo Nizhe-

- gorodskogo gosudarstvennogo universiteta, N. Novgorod, 226 p. [in Russian] URL: <https://www.twirpx.com/file/663804/>
8. Volkov, YuG. & Korotkih, YuG 2008, Uravneniya vyazkouprugo-plasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of viscoelastic – plastic continuum with damages]. FIZMATLIT, Moscow, 424 p. [in Russian] URL: <https://www.twirpx.com/file/2524622/>
9. Bogatov, AA, Mizhirickij, OI & Smirnov SV 1984, Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem [Resource of metals plasticity by pressure processing]. Metallurgiya, Moscow, 144 p. [in Russian] URL: <https://www.twirpx.com/file/1028260/>
10. Marka, D & MakGouen, K 1993, Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya [Structural Analysis and Design Methodology]. Meta Tehnologiya, Moscow, 240 p. [in Russian]
11. Illushko, V, Abdul-Retha, E, Sokolov, A, Zaretskaya, I, Dierks, S & Marques P 2016, Modern Integrated Technology of Information Systems Design and Development: From Programming to Project Management. Marques Aviation, United Kingdom, 443 p.
12. Hejfec, ML and Chemisov, BP (ed.) 2002, Intellektualnoe proizvodstvo: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Intellectual production: state and development prospects] / Pod obsh. red. . PGU, Novopolock, 268 p. [in Russian]
13. Denkena, B, Mörke, T, Krüger, M, Schmidt, J, Boujnah, H, Meyer, J, Gottwald, P, Spitschan B & Winkens, M 2014, Development and first Applications of Gentelligent Components over their Life-Cycle. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013. volume 7(2). P. 139-150. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.12.006
14. Kolmogorov, VL 1970, Napryazheniya, deformacii, razrusheniya [Stresses, deformations, fractures]. Metallurgiya, Moscow, 229 p. [in Russian]. URL: <https://www.twirpx.com/file/103478/>
15. Murakami, Sumio 2012, Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. Springer: Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 402 p. doi: 10.1007/978-94-007-2666-6
16. Algin, VB 2010, Tehnologicheskie i ekspluatacionnye metody obespecheniya kachestva mashin [Technological and operational methods for providing the machines quality] / V. B. Algin [and others] ; P. A. Vityaz (red). Belarus. navuka, Minsk, 109 p. [in Russian]
17. Dalskij, AM 1975, Tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnyh detalej mashin [Technological providing of the high-precision machine parts reliability]. Mashinostroenie, Moscow, 223 p. [in Russian] URL: <https://www.twirpx.com/file/668865/>