

УДК 573.7 : 621.787

DOI:10.30987/2223-4608-2020-11-16-29

**А.А. Кречетов**, к.т.н., **В.Ю. Blumenштейн**, д.т.н., **Л.И. Законнова**, д.биол.н.  
(ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)  
E-mail: blumensteun@rambler.ru

## **Анализ механизмов наследования в живой природе и технике\***

*Проанализирована эволюция представлений о наследовании и представлены основные типы наследования в живой природе. Исходя из анализа терминов, принятых в генетике и технологии машиностроения, выполнен анализ механизмов наследования при механической обработке и эксплуатации деталей машин. Показана эволюция представлений о наследовании и носителях наследственной информации: вначале изготавливаемая деталь, точностные параметры которой «копировались» (наследовались) по ходу технологического процесса; далее – тонкий поверхностный слой, формирующийся на всем протяжении технологического процесса и в рамках выполненного научного исследования – материал очага деформации, в котором происходит пластическое течение металла. Выполнен анализ и представлены направления развития научных исследований в области технологического наследования.*

**Ключевые слова:** наследование; ген; технологическая наследственность; качество поверхностного слоя; механика технологического наследования; программа нагружения; запас пластичности.

**A.A. Krechetov**, Can. Sc. Tech., **V.Yu. Blumenstein**, Dr.Sc.Tech., **L.I. Zakonnova**, Dr.Sc.Bio.  
(FSBEI HE “Gorbachyov State Technical University of Kuzbass”, 28, Vesenniyaya Str., Kemerovo, Russia, 650000)

## **Analysis of inheritance mechanisms in animate nature and engineering**

*The evolution of ideas on inheritance is analyzed and basic types of inheritance in animate nature are presented. Reasoning from the analysis of terms adopted in genetics and engineering technique there is carried out the analysis of inheritance mechanisms at machining and machinery operation. There is shown the evolution of ideas on hereditary information: first the part manufactured the accuracy dimensions of which were “copied” (inherited) in the course of engineering procedure; further – a thin surface layer formed during the engineering process and within the frames of the scientific investigation carried out – material of the deformation source where a plastic metal flow takes place. An analysis is carried out and the directions of the development of scientific investigations in the field of technological inheritance are presented.*

**Keywords:** inheritance; gene; technological inheritance; quality of surface layer; mechanics of technological inheritance; program of loading; ductility margin.

### **О механизмах наследования в живой природе**

Представления о наследовании в живой природе претерпевали эволюционные измене-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587.

ния в процессе становления и развития естественных наук. Сосуществовавшие в эпоху Античности материалистическая философия Фалеса, Гераклита, Аристотеля и др. и идеалистическое учение пифагорейцев в начале XVIII в. сменились теорией неизменности живого. Наиболее яркими представителями метафизического направления считают Жоржа Кювье и Карла Линнея: «Видов столько,

сколько различных форм произвел в начале мира Всемогуший; эти формы, согласно законам размножения, произвели множество других, но всегда подобных себе» [1].

В XIX в. возобладали эволюционистский подход, обоснованный теорией Чарльза Дарвина: организм эволюционирует, основные движущие силы эволюции – наследственность, изменчивость, естественный отбор [2].

Совершенствовались представления о наследственности и механизмах наследования, среди них следует выделить следующие.

1. **Ламаркизм** – автор Ж.Б. Ламарк. Согласно его теории, организм стремится к повышению уровня организации. Этот процесс динамичен, протекает в постоянно изменяющихся условиях среды, к которым виды должны адаптироваться, изменяя свою первоначальную природу (первый закон Ламарка). Возникающие изменения наследственно закрепляются – второй закон Ламарка [3] (если у кошки удалить часть хвостовых позвонков, котята рождаются бесхвостыми). Учение Ламарка до абсурда доведено Т.Д. Лысенко и последователями в первой половине XX в.

2. **Генетика (генное наследование)**. Ее развитие в хронологическом порядке:

- сформировано ядро классической генетики – законы Менделя (1865-1866 г.г.), Моргана (1915 г.);

- Рональд Фишер объединил популяционную генетику с теорией естественного отбора Дарвина. Таким образом, создан современный эволюционный синтез, генетическая теория естественного отбора;

- развитие молекулярной биологии способствовало объяснению процессов наследования на молекулярном уровне. Появилась эволюционная теория развития.

Здесь следует упомянуть имена ученых, чей вклад в развитие науки невозможно переоценить: Н.В. Тимофеев-Ресовский, Ф.Г. Добржанский, С.С. Четвериков. По формулировке А.С. Северцова: «Функциональной единицей наследственной информации является ген – комплекс нуклеотидов, кодирующих одну полипептидную цепь».

Важнейшая нуклеиновая кислота – ДНК, как видно на представленной схеме (рис. 1), локализована преимущественно в хромосомах клеточного ядра у ядерных организмов эукариот, а у безъядерных (прокариот) – непосредственно в цитоплазме клетки.

В реализации программы экспрессии генов участвуют два вида нуклеиновых кислот – ДНК и РНК. ДНК состоит из двух комплементарных цепочек, образованных за счет водородных связей между пуриновыми и пиримидиновыми основаниями. ДНК бессмертна, стабильна, способна к репарации, она обеспечивается механизмом экспрессии генов для синтеза белковых продуктов.

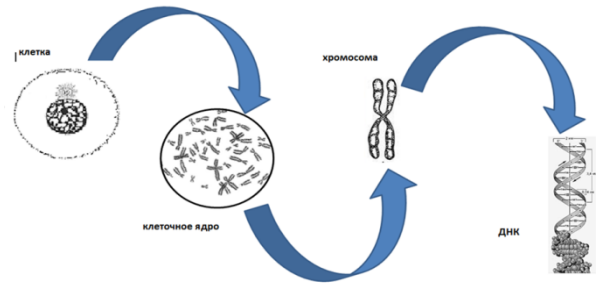


Рис. 1. Схема ДНК

Функционально гены разделяют на структурные (кодирующие белки) и регуляторные, совместная работа обеспечивает несколько типов наследования: *аутосомно-доминантный и аутосомно-рецессивный, сцепленное с полом доминантное и рецессивное наследование, ограниченные полом аутосомный и голландрический типы наследования*. Отдельно следует отметить *митохондриальное наследование*, так как в структуре митохондрий есть собственные ДНК (цитоплазматическое ядерное наследование).

Лишь немногие признаки организмов кодируются только одним аллелем, т.е. парой генов, расположенных в гомологичных хромосомах. Например, классический Менделевский желтый и зеленый горох. Менделирующие признаки выявляются по фенотипу и, следовательно, их легко селекционировать. Но большинство признаков – полигенны, т.е. кодируются группой неаллельных генов. Это комплементарное наследование, полимерия, эпистаз, плейотропия. Настоящим бедствием для селекционеров является плейотропное, совместное действие генов, когда один из генов, отвечающих за тот или иной признак, начинает оказывать негативное влияние на весь генотип в целом, практически уничтожая результаты многолетней селекции.

3. **Негенетическое наследование**. Стронники теории негенетического наследования важное значение придают влиянию среды на наследование. В новой концепции фенотипической пластичности возрождается идея Ж.Б. Ламарка о наследуемости фенотипических признаков [4]. История сделала полный виток: учение Ж.Б. Ламарка снова становится актуальным!

**Практическая реализация основных теоретических положений и закономерностей науки о наследовании осуществляется селекцией**. Существует два подхода к селекционной работе: традиционный, основанный на методах искусственного отбора и современный, основанный на новейших методах селекции: генной, хромосомной и клеточной инженерии.

Рассмотрим наиболее применяемые методы селекции.

*Индукцированный мутагенез* – возникновение наследственных изменений в результате воздействия на организм мутагенов. По мнению Р.М. Цоя [5] «Речь идет в первую очередь о мутациях генов, влияющих на проявление признаков продуктивности: роста, выживаемости, устойчивости к заболеваниям и др. При этом не исключается возможность возникновения каких-то качественных мутаций, что ведет к появлению особей с новыми, представляющими интерес для селекционера свойствами». Для селекции рыб этот метод в середине 1960-х г.г. разработан под руководством В.С. Кирпичникова, затем продолжен Р.М. Цоем и соавторами [5 – 6]. Особенно эффективно применение метода для ускоренной элиминации рецессивных мутаций. Отмечено, что при селекции карпа [5], уже во втором геногенетическом поколении 80...90 % всех генов переходит в гомозиготное состояние, что приводит к фенотипическому проявлению многих рецессивных, в том числе и полезных, мутаций, что резко ускоряет мутагенную селекцию [5, 6].

*Отдаленная гибридизация* – наиболее часто применяемый метод традиционной селекции. Большое внимание при селекционной работе уделяется исследованию гетерозиса при межпородных скрещиваниях [7 – 16]. По мнению В.А. Струнникова [12], формированию гетерозисного фенотипа способствует проведение систематического длительного искусственного отбора, при котором возможен дрейф генов, обуславливающих нежелательные комбинации. Вместе с тем, по мнению одного из авторов, длительное разведение «в себе», может привести к возникновению инбредной депрессии.

Правильный выбор селекционируемых признаков до сих пор остается серьезной проблемой. При выборе таких признаков необходимо учитывать корреляционные связи между селекционируемыми параметрами, так как напряженный отбор по определенному признаку может, наряду с полезными изменениями, привести к развитию нежелательных корреляций.

Все эти соображения позволили одному из авторов построить и реализовать модель селекции беловского карпа (п. Инской, Беловский район, Кузбасс) [13].

Существует два подхода к формированию модели: первый ограничивает факторы системы небольшим количеством значимых параметров, во втором описывается взаимодействие всех элементов системы и делается вывод по всей ее интегральной совокупности [14 – 15].

Группа местного беспородного карпа, рассматривается как популяция с общим «генетическим пулом», при разделении которого путем создания барьера в виде assortативного

подбора одной линии и гетерогенного – другой, возникает обособленность популяций, которая приводит к генетической разобщенности, достаточной для получения гетерозисного эффекта.

В искусственно формируемых подпопуляциях, каковыми можно считать чешуйчатую и разбросанную линии беловского карпа, селекционно-значимым признано небольшое количество параметров. Остальные параметры при этом не являются константами, но и не коррелированы с селекционно-значимыми признаками, поэтому для формирования селекционной модели целесообразным признано ограничить факторы системы небольшим количеством значимых параметров.

Методической основой селекции беловского карпа признано двухлинейное разведение на основе местного беспородного стада производителей с целью получения гетерозисного эффекта.

Эффективность селекции оценивалась расчетным путем по разработанным экспоненциальным регрессионным моделям, а также с использованием качественных показателей, таких как динамика массы тела производителей, динамика относительной рабочей плодовитости самок, динамика распределения особей в структуре стада в сторону увеличения эксцесса и асимметрии, отсутствие расщепления по типу чешуйного покрова в чешуйчатой линии, отсутствие расщепления по генам альбумино-трансферринового комплекса в чешуйчатой линии, гетерозисный эффект при межлинейном скрещивании, выражающийся в повышении выживаемости и темпа роста в помесных формах по сравнению с чистыми линиями.

В результате реализации разработанного метода повышения продуктивных и воспроизводительных качеств двухлинейного маточного стада тепловодного беловского карпа, сформированного на основе местной беспородной группы рыб, к 2011 г. в шестом поколении беловского карпа достигнут максимальный селекционный эффект. Выживаемость молоди в межлинейных гибридных формах стабильно достигает 97 %.

В биологии для количественной оценки наследуемости используются различные коэффициенты, например:

- коэффициент  $h^2$ , определяющий долю генотипической изменчивости в структуре общей наблюдаемой изменчивости:

$$h^2 = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_G^2 + \sigma_F^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_G^2$  – дисперсия генотипической изменчивости (дисперсия генотипа);  $\sigma_F^2$  – дисперсия модификационной (обусловленной влиянием среды) изменчивости (дисперсия фенотипа);

- коэффициент наследуемости:

$$H = \frac{K_{MB} - K_{DB}}{100 - K_{DB}} (\%), \quad (2)$$

где  $K_{MB}$  и  $K_{DB}$  – коэффициенты парной конкордантности (показатель идентичности/совпадения какого-либо признака у близнецов) в группе монозиготных и дизиготных близнецов соответственно. Если  $H = 0$ , то развитие признака обусловлено только факторами внешней среды; если  $0,7 \leq H \leq 1$ , то наследственные факторы имеют доминирующее значение; если  $0,4 \leq H < 0,7$ , то данный признак развивается под действием факторов внешней среды при наличии генетической предрасположенности.

### О терминологии в области технологической наследственности

Как известно, явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим называется технологическим наследованием, а сохранение этих свойств – технологической наследственностью [16 – 17]. В течение последних примерно 70...80 лет исследований сложилась определенная терминология в области технологической наследственности/технологического наследования (ТН). Вполне очевидно, что многие термины заимствованы из биологии/генетики, включая сам термин «наследование». В то же время развитие представлений о технологической наследственности качества поверхностного слоя, механике технологического наследования, волнах локализованной пластичности и др. позволило дать новое толкование некоторым из них и предложить термины, отражающие содержание выполненных исследований (табл. 1).

Исходя из анализа терминов, принятых в генетике и технологии машиностроения, проведем анализ механизмов наследования при механической обработке и эксплуатации деталей машин.

### Технологическая наследственность геометрических параметров деталей машин

В 1930 – 1960-е г.г. ключевое внимание уделялось вопросам повышения точности механической обработки и сборки машиностроительных изделий. Соколовский А.П., анализируя точность обработки деталей на металлорежущих станках, показал, что высокая жесткость технологической системы является одним из основных условий обеспечения высокой точности обработки [18]. Введено понятие «уточнение», под которым понимают отношение одноименных погрешностей заготовки  $\Delta_{заг}$  и обрабатываемой детали  $\Delta_{дет}$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{заг}}{\Delta_{дет}}. \quad (3)$$

Неточность заготовки отражается на обработанной детали в виде аналогичной неточности: погрешность заготовки **копируется/наследуется** на детали. Исходя из жесткости технологической системы:

$$\varepsilon = \frac{j}{\lambda C_p S^q}, \quad (4)$$

где  $j$  – жесткость технологической системы;  $\lambda = P_y/P_z$  – отношение составляющих силы резания;  $C_p$  – коэффициент, зависящий от материала и геометрии инструмента;  $S$  – подача.

К 1950-м г.г. сложилось учение о припусках в машиностроении. Кован В.М. предложил проводить размерный анализ от конечной (сборка) к начальной (заготовка) стадиям производства, что нашло отражение в методике расчета припусков [19]:

$$2z_B \geq \delta_a + (H_a + T_a) + |\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_B|, \quad (5)$$

$z_B$  – припуск на сторону для выполняемого размера;  $\delta_a$  – допуск на размер, полученный на смежном предшествующем переходе;  $H_a$  – средняя высота поверхностных микронеровностей, полученных на предшествующем переходе;  $T_a$  – учитываемая глубина поверхностного слоя, полученного на предшествующем переходе;  $\bar{\rho}_a$  – векторная сумма пространственных отклонений взаимосвязанных поверхностей обрабатываемой детали, получившихся на предшествующем переходе;  $\bar{\varepsilon}_B$  – векторная сумма погрешностей базирования и закрепления, т.е. погрешность установки при выполняемом переходе.

Таким образом, предшествующий переход определял величину припуска, т.е. учитывались *наследуемая шероховатость и наклеп (упрочнение) поверхностного слоя*. Обратим внимание на то, что в данной методике предполагалось, что величина припуска должна предусматривать удаление не только предшествующей шероховатости, но и наклепа (упрочнения) металла поверхностного слоя от предшествующего перехода.

Многочисленными исследованиями установлено *технологическое наследование конструктивных форм, волнистости и других погрешностей более высокого порядка*.

Можно полагать, что в 1930...1960-е г.г. носителем наследственной информации считалась *изготавливаемая деталь, точностные параметры которой «копировались» (наследовались) по ходу технологического процесса*.

1. Некоторые термины в области технологической наследственности/наследования

Термин	Терминология в области	
	биологии	технологии машиностроения
Наследование	Передача генетической информации от одного поколения организмов другому	Явление переноса свойств объектов / структуры от предшествующих операций к последующим
Наследственность	Свойство организмов обеспечивать материальную и функциональную преемственность между поколениями	Сохранение свойств объектов / структуры на стадиях жизненного цикла
Наследуемость	Генотипическая обусловленность изменчивости признака для популяции или группы организмов	Определенная обусловленность изменчивости параметров состояния металла на стадиях обработки/нагрузки поверхностного слоя
Ген (греч. Genos – род, происхождение)	Наследственный фактор, функционально неделимая единица генетического материала	Элемент атомарной структуры металла поверхностного слоя детали. Дислокация
Генотип	Совокупность структурных состояний гена или группы генов, контролируемых анализируемый признак у данного организма	Совокупность состояний атомарной/дефектной структуры металла поверхностного слоя
Фенотип (греч. Phaino – являю, обнаруживаю)	Совокупность всех признаков и свойств особи, формирующихся в процессе взаимодействия генотипа и внешней среды	Совокупность всех свойств поверхностного слоя металла детали, формирующихся в процессе взаимодействия генотипа и программ нагружения
Изменчивость, модификация, доминантность и т.д.	Изменчивость – свойство живых организмов существовать в различных формах (вариантах). Приобретение новых признаков, отличающих их от других поколений под влиянием факторов внешней среды	Свойство металла поверхностного слоя детали существовать в различных состояниях
Генотипическая изменчивость	Затрагивает генотип. В ее основе лежат мутации и рекомбинации	Связана со структурным состоянием металла
Фенотипическая изменчивость	На затрагивает генотип. Модификации не передаются по наследству и с течением времени затухают, т.е. возвращаются к исходному фенотипу через большее (длительные модификации) или меньшее (кратковременные модификации) число поколений	Связана с внешними воздействиями (нагрузками) на металл поверхностного слоя

**Технологическая наследственность качества поверхностного слоя**

К началу 1960-х г.г. существенно возросли требования к надежности деталей машин, что потребовало нового подхода к оценке технологических процессов. Ящерицын П.И., выполнив комплекс исследований точности и качества поверхностного слоя (ПС) деталей подшипников, обосновывает необходимость *рассмотрения свойств обработанных поверхностей в зависимости от всей совокупности выполняемых операций* [20].

Показано, что в технологическом процессе существуют своеобразные «барьеры», являющиеся препятствием для некоторых параметров, описывающих поверхностный слой изделия. При этом выделяют **положительные и отрицательные факторы технологической наследственности**; при проектировании технологических процессов в структуру следует

вводить операции, которые создавали бы больше препятствий к прохождению к финишной операции отрицательных факторов.

Впервые применено математическое моделирование технологического процесса с учетом ТН [16]. Показано, что общая структура технологического процесса может быть представлена как сложная многомерная система, в которой на вход поступают различные характеристики заготовки, а на выходе обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для готовой детали; изменения определяются действием некоторой совокупности технологических факторов для каждой операции технологического процесса. Решение математической многомерной модели позволило определить влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя по ходу процесса изготовления и его влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

В этот же период А.М. Дальский [21] доказал роль наследственности в обеспечении надежности высокоточных деталей машин. Концептуальная модель разработана с использованием метода графов; описан ряд последовательных наследственных состояний поверхностного слоя по ходу технологического процесса.

При этом общее число наследуемых свойств определится одной из сумм:

$$M = \rho(A_1) + \rho(A_2) + \dots + \rho(A_n) = \rho^*(A_1) + \rho^*(A_2) + \dots + \rho^*(A_n), \quad (6)$$

где  $\rho(A_1), \rho(A_2), \dots, \rho(A_n)$  – число ребер, выходящих из вершин  $A_1, A_2, \dots, A_n$  графа;  $\rho^*(A_1), \rho^*(A_2), \dots, \rho^*(A_n)$  – число ребер, входящих в эти вершины;  $n$  – число вершин графа.

Автор полагает, что рассматриваемые графы сходны с графами генеалогическими и показывают **передачу наследственной информации** от одного объекта к другому. При этом сами графы могут быть циклическими, имеющими и не имеющими обратных связей. В ходе технологического процесса дефекты в поверхностном слое могут развиваться или «залечиваться» в зависимости от получаемой наследственной информации.

Наряду с графическим представлением использованы и количественные оценки в виде взаимной корреляционной функции, нормированной корреляционной функции и системы наследственных коэффициентов:

$$k_i = \frac{C_i}{C_{i=n}}, \quad (7)$$

где  $k_i$  – коэффициент изменения какого-либо свойства;  $C_i$  – свойство на текущей операции;  $i$  и  $n$  – номер текущей операции и число операций сверх  $i$ , после проведения которых количественно определяется величина данного свойства.

Также подробно рассмотрены наследственные связи, начиная от заготовки до момента сборки и последующей эксплуатации высокоточных изделий.

Отмечается, что **носителями наследственной информации являются собственно материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей.**

Дальским А.М., Васильевым А.С. и Кондаковым А.И. были проведены фундаментальные исследования и установлены основные формы наследования, проявляющиеся в технологических средах различных уровней: параметрической, структурное и наследование характеристик взаимодействия выделенного объекта (заготовки) с внешней средой [21]. При этом авторы рассматривают технологическую среду как виртуальный объект, взаимодействие которого с предметом труда приводит к таким же результатам, что и у совокупно образующих его объектов. Сквозной техноло-

гический процесс изготовления изделия представляется как процесс трансформации и сохранения свойств изделия.

Превалирует мнение о том, **что носителем наследственной информации является тонкий поверхностный слой, формирующийся на всем протяжении технологического процесса.**

Оценка параметрического наследования позволяет выявить и проследить наследственные связи по ограниченному кругу параметров качества изделия (детали). **Структурное наследование** представляет собой наследование структуры технологического объекта – родителя другим (наследником) при тождественности их функциональных классов. И, наконец, **наследование характеристик**, по мнению авторов, практически не исследовано, хотя его влияние на эксплуатационные свойства является исключительно важным.

Математический аппарат базируется на следующих основных положениях:

1. Качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории. Множество показателей качества (свойств) детали является результатом технологической предыстории.

2. Любое (технологическое и связанное с ним) воздействие на заготовку изменяет все показатели качества (свойства) заготовки.

3. Любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества (свойства) заготовки.

Основная математическая модель для множества значений показателей качества детали после выполнения операций ее изготовления с учетом закономерностей технологического наследования была представлена в виде:

$$[K]_i = [K]_{j-1} + [\Delta K]_T + [\Delta K]_Y + [\Delta K]_P, \quad (8)$$

где  $[K]_{j-1}$  – множество значений показателей качества, характеризующих состояние детали после выполнения предшествующей операции;  $[\Delta K]_T$  – множество изменений значений показателей качества детали вследствие прямого воздействия технологических методов операции;  $[\Delta K]_Y$  – множество изменений значений показателей качества вследствие воздействия условий реализации технологических методов  $j$ -й операции;  $[\Delta K]_P$  – множество изменений значений показателей качества множества (детали), связанных с предысторией.

Суслов А.Г. полагает, что описание **технологической наследственности** может быть представлено различными вариантами структурных моделей. Ключевое внимание уделяется совершенствованию методов обработки и сборки, разработке аналитического расчетного аппарата процессов с учетом ТН [22]. При этом проектирование, изготовление, эксплуа-



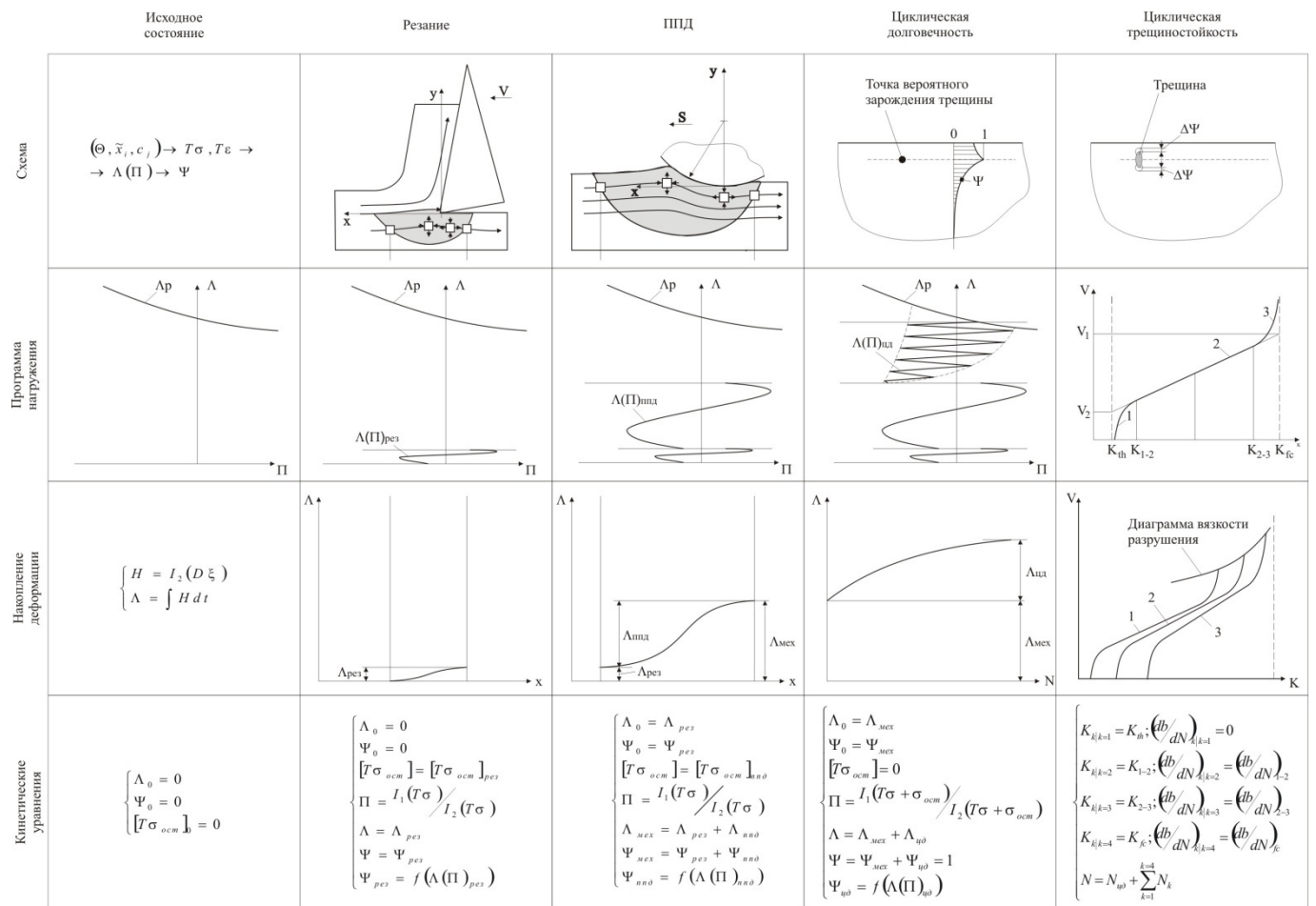
тация и ремонт деталей машин рассматриваются как единый процесс. **Носителем наследственной информации является поверхностный слой детали.**

**Механика технологического наследования**

В рамках механики технологического наследования проводится оценка накопления деформаций и истощения запаса пластичности в очагах пластической деформации на стадиях жизненного цикла в условиях изменяющейся схемы напряженно-деформированного состояния. Наряду с известными показателями качества для моделирования, выполнения расчетов и экспериментальных исследований используются известные из механики деформируемого твердого тела такие пара-

метры, как показатель схемы напряженного состояния  $\Pi$ , степень деформации сдвига  $\Lambda$ , тензор остаточных напряжений  $[T\sigma_{ост}]$ , степень истощения запаса пластичности (СИЗП)  $\Psi$  и другие [23 – 24]. СИЗП – это скаляр, характеризующий отношение накопленной деформации к предельной для данного показателя схемы напряженного состояния; в неупрочненном металле  $\Psi = 0$ , а при полном истощении запаса пластичности  $\Psi = 1$ .

Закономерности накопления деформации и истощения запаса пластичности при одинаковых технологических и эксплуатационных воздействиях определяются структурным состоянием металла, в том числе, характерным размером структуры  $\tilde{x}_i$ , температурными параметрами реализации процесса  $\Theta$ , особенностями химического состава  $c_j$  (рис. 2).



**Рис. 2. Механика накопления деформации и поврежденности металла поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла**

Технологические и эксплуатационные воздействия приводят к возникновению тензоров напряжений и деформаций  $T\sigma$  и  $T\varepsilon$ . Общий уровень накопленной деформации определяется значением накопленной степени деформации сдвига  $\Lambda$ .

Накопление деформации в условиях изменения напряженного состояния, характеризующегося показателем  $\Pi$ , приводит к накоплению поврежденности металла, которая характеризуется показателем степени истощения запаса пластичности  $\Psi$ .

Разрушение металла происходит при достижении деформации предельного значения  $\Lambda_p$ . При этом значение предельной деформации зависит от показателя напряженного состояния. Для деформирования в условиях сжатия, когда  $\Pi < 0$ , предельное значение деформации, которое материал может накопить до разрушения больше, чем для деформирования в условиях растяжения, при положительных значениях  $\Pi$ . Зависимость  $\Lambda_p(\Pi)$  называется диаграммой пластичности и является одной из базовых механических характеристик материала.

Выбор степени деформации сдвига  $\Lambda$  для оценки уровня накопленной деформации обусловлен инвариантностью этой характеристики относительно выбранных параметров расчета исходных характеристик тензора деформаций. Так, степень деформации сдвига определяется интегрированием значений интенсивности скоростей деформаций сдвига  $H$  по времени. В свою очередь интенсивность скоростей деформаций сдвига определяется через второй инвариант девиатора скоростей деформаций.

Предполагается, что в исходном состоянии значения накопленной деформации и поврежденности металла равны нулю. Остаточные деформации отсутствуют. Однако следует отметить, что в ряде случаев возможно наличие и предварительно накопленной деформации и поврежденности, а также наличие предварительно сформированных остаточных напряжений. Например, такое состояние может быть сформировано при изготовлении исходной заготовки методами холодной пластической деформации.

На стадии резания возникает очаг деформации, часть металла уходит в стружку, часть металла – под инструмент. Траектории движения материальных частиц относительно инструмента в очаге деформации представляют собой линии тока. При движении материальной частицы вдоль линии тока происходит пластическое деформирование, при этом знак деформирования меняется, также меняются закономерности изменения напряженного состояния. Закономерности накопления деформации в условиях изменения напряженного состояния при резании определяют программу нагружения  $\Lambda(\Pi)_{рез}$ .

$\Pi$  представляет собой функцию степени деформации сдвига  $\Lambda$ , накопленной вдоль линии тока в ОД, от показателя схемы напряженного состояния  $\Pi$  в виде  $\Lambda = \Lambda(\Pi)$ .

Показатель  $\Pi$ , характеризующий напряженное состояние, определяется как отношение первого инварианта  $I_1(T\sigma)$  ко второму инварианту тензора напряжений  $I_2(T\sigma)$ . В зоне перед инструментом напряженное состояние смягчается, программа нагружения смещается

влево, далее напряженное состояние ужесточается, что приводит к смещению программы нагружения вправо. В зоне за инструментом, накопление деформации происходит в условиях смягчения напряженного состояния.

После операции резания формируется тензор остаточных напряжений  $[T\sigma_{ост}]_{рез}$ , накапливается деформация  $\Lambda_{рез}$ . Действие программы нагружения  $\Lambda(\Pi)_{рез}$  рассматривается как механизм накопления поврежденности металла  $\Psi$ , которое после операции резания достигает значения  $\Psi_{рез}$ .

Накопленные в результате резания значения деформации и поврежденности ( $\Lambda_{рез}$  и  $\Psi_{рез}$ ) являются исходными для поверхностного пластического деформирования. В возникающем очаге деформации при движении вдоль линий тока продолжается накопление деформации поврежденности металла, программа нагружения  $\Lambda(\Pi)_{ппд}$  определяет закономерности накопления деформации в условиях изменения напряженного состояния при поверхностном пластическом деформировании.

Вид программы нагружения имеет схожий характер с программой нагружения при резании, однако, накопление деформации, а также размах показателя напряженного состояния значительно больше.

После операции поверхностного пластического деформирования формируется тензор остаточных деформаций  $[T\sigma_{ост}]_{ппд}$ , накапливается деформация  $\Lambda_{ппд}$ . Действие программы нагружения  $\Lambda(\Pi)_{ппд}$  рассматривается как механизм накопления поврежденности металла  $\Psi$ , которое после операции поверхностного пластического деформирования достигает значения  $\Psi_{ппд}$ .

В результате всех операций механической обработки происходит накопление деформации и поврежденности ( $\Lambda_{мех}$  и  $\Psi_{мех}$ ), значения которых определяются суммированием значений накопленной деформации и поврежденности на всех операциях механической обработки. Эти значения, а также тензор остаточных напряжений, сформированный в результате механической обработки, являются начальными для стадии циклической долговечности.

При циклическом нагружении в поверхностном слое продолжается накопление деформации и поврежденности. Программа нагру-



жения на стадии циклической долговечности  $\Lambda(\Pi)_{\text{цд}}$  в каждом цикле нагружения переходит из отрицательной области показателя напряженного состояния в положительную и обратно. Важной особенностью этой стадии является совместное действие тензоров остаточных и эксплуатационных напряжений. При этом остаточные напряжения с увеличением количества циклов нагружения уменьшаются, и к концу стадии циклической долговечности полностью исчезают. В связи с этим вид программы нагружения с увеличением количества циклов нагружения изменяется.

Этот сложный характер программы нагружения на стадии циклической долговечности обуславливает сложный характер накопления поврежденности по глубине поверхностного слоя. В ряде случаев предельное значение показателя степени истощения запаса пластичности достигается на некоторой глубине поверхностного слоя.

В конце стадии циклической долговечности накопленная деформация достигает предельного значения  $\Lambda_p$ , остаточные напряжения в поверхностном слое отсутствуют. Действие программы нагружения  $\Lambda(\Pi)_{\text{цд}}$  рассматривается как механизм накопления поврежденности металла  $\Psi$ , которое после стадии циклической долговечности достигает значения  $\Psi_{\text{цд}}$ . Накопленная поврежденность на всех стадиях в конце стадии циклической долговечности соответствует предельному значению степени истощения запаса пластичности  $\Psi = 1$ . Этот момент соответствует моменту появления начальной трещины.

На стадии циклической трещиностойкости в вершинах трещины располагаются области, в которых материал находится в состоянии пластического течения, что обуславливает продолжение накопления в этих областях деформации и поврежденности. При достижении предельного уровня поврежденности в этих областях происходит разрушение, и увеличение размера трещины на величину этих областей.

Изменение геометрических размеров трещины приводит к изменению действующих напряжений в устье трещины, что в сочетании с накоплением деформаций и поврежденности на стадии циклической трещиностойкости обуславливает изменение скорости роста трещины.

Развитие трещины описывается в категориях диаграмм циклической трещиностойкости  $V = V(K)$  в координатах «ось  $x$  – коэффициент интенсивности напряжений  $K$ » – «ось  $y$  – скорость роста усталостной трещины  $V$ ».

Коэффициент  $K$  характеризует напряженно-деформированное состояние в области вершины трещины. Вид диаграммы циклической трещиностойкости определяется историей нагружения на предшествующих стадиях жизненного цикла изделия.

Таким образом, *в рамках механики технологического наследования носителем наследственной деформации является материал очага деформации, в котором происходит пластическое течение металла, а состояние металла в нем рассматривается при использовании единой методологии – накопления деформаций и истощения запаса пластичности.* Процессы нагружения рассматриваются в режиме online, т.е. рассматривается *процесс технологического наследования*; физическое состояние поверхностного слоя определяется как результат пластического течения металла в очаге деформации, протекающего в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. На каждой стадии нагружения происходит *непрерывное накопление деформаций и истощение запаса пластичности металла* в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения.

При проведении расчетов НДС в наследственной постановке принимают следующие условия: геометрические параметры ОД, условия на контакте инструмента/индентора с металлом детали, значения напряжений на передней внеконтактной границе ОД, глубину, степень упрочнения и др. [25]. Важным является то, что форма и размеры ОД на каждой последующей стадии зависят от накопленных ранее свойств, с одной стороны, и полностью и адекватно определяют состояние поверхностного слоя после обработки на данной стадии, с другой стороны.

Как было отмечено, для количественной оценки истории нагружения (технологического наследования) предложено использовать представления о программе нагружения (ПН) (см. рис. 1). Программа нагружения описывает накопление деформаций в условиях изменяющейся схемы напряженного состояния металла поверхностного слоя в очаге пластической деформации на каждой стадии нагружения. Тем самым программа нагружения раскрывает физические закономерности формирования поверхностного слоя. Удобство ее использования в теории технологического наследования заключается в том, что она: имеет серьезную научную основу, базирующуюся на фундаментальном разделе физики – механике сплошных сред; имеет технологический смысл, так как полностью определяется технологическими факторами; не противоречит существующим инженерным параметрам состояния поверхностного слоя, так как степень

деформации  $\Lambda$  имеет связь с твердостью, а показатель напряженного состояния  $\Pi$  – с остаточными напряжениями; может быть использована для каждой операции (стадии нагружения), включая механическую обработку и последующее эксплуатационное нагружение, что дало возможность выполнить сквозной анализ всех стадий обработки и эксплуатации деталей с единых методологических позиций; имеет четкую связь со степенью исчерпания запаса пластичности металла.

Сквозные аналитические расчеты НДС, анализ формирования и трансформации программ нагружения, накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности по стадиям резания, ППД, циклической долговечности (ЦД) и циклической трещиностойкости (ЦТ) позволили выявить механизмы технологического наследования.

Выявлено, что программа нагружения на стадиях резания и ППД включает три этапа квазимонотонной деформации, на границах которых смена знака деформации происходит скачкообразно, соответственно, скачкообразно изменяется численное значение показателя схемы напряженного состояния. Смена знака деформации приводит к частичному залечиванию дефектов и восстановлению запаса пластичности металла.

Каждый этап квазимонотонной деформации в категориях программ нагружения может быть аналитически описан экспоненциальной функцией следующего вида:

$$\Lambda_i = \Lambda_0 + \frac{1}{\sigma_{\Pi\sqrt{2}}} e^{-\frac{(\Pi_i - \Pi_j)^2}{2\sigma_{\Pi}^2}}, \quad (9)$$

где  $\Lambda_i$  – начальное значение деформации на данном этапе;  $\Lambda_0$  – стартовое (накопленное, унаследованное) значение деформации на данном этапе;  $\Pi_i$  и  $\Pi_j$  – начальное и конечное значения показателя схемы напряженного состояния на данном этапе;  $\sigma_{\Pi}$  – наследственный параметр, характеризующий среднее квадратическое значение показателя схемы на данном этапе;  $\sigma_{\Pi}$  зависит от истории нагружения, в частности, от ранее накопленной деформации (стартового значения степени деформации сдвига)  $\Lambda_0$ . Стартовое и финишное значения показателя схемы на данном этапе характеризуют размах  $\Delta\Pi$  на этапе и также зависят от истории нагружения, т.е. от харак-

$$\Lambda(\Pi) = \Lambda_0 + k \cdot \sum_{j=1}^{j=n} \left\{ \int_{\Pi_{ij}}^{\Pi_{ij}} \frac{1}{\Pi_{ij}} \cdot \frac{\Lambda_{ij}}{(-45,2) \exp\left(-\frac{(\Lambda(\Pi_{ij}))^2}{0,28}\right)} \Lambda(\Pi_{ij}) d\Pi \right\}, \quad (12)$$

где  $i$  – номер квазимонотонного этапа;  $j$  – номер стадии нагружения;  $n$  и  $m$  – число стадий и квазимонотонных этапов соответственно;  $\Lambda(\Pi_{ij})$  – программа нагружения на текущем квазимонотонном этапе;  $\Lambda_{ij}$  и  $\Pi_{ij}$  – соответ-

тера изменения программ нагружения на предшествующих этапах.

Для каждой стадии и этапов определены численные значения или зависимости от технологических факторов наследственных параметров программ нагружения.

Под влиянием накопленной (наследуемой) деформации (истории нагружения) программа нагружения каждой следующей стадии стар-тует с более «жестких» (более положительных) значений показателя схемы напряженного состояния. Иными словами, стартовое значение программы каждой следующей стадии нагружения все более смещается в положительном направлении оси абсцисс. При этом программа нагружения «сжимается» вдоль осей координат, размах  $\Delta\Pi$  уменьшается, что означает меньшие значения накопленной деформации на данной стадии в сравнении с предыдущей. Изменяется характер накопления деформаций на каждой последующей стадии, что выражается в уменьшении скорости этого накопления.

Общее описание механизма наследования в процессах механической обработки при формировании программы нагружения  $i$ -го этапа при наличии  $n$  предшествующих этапов представлено в следующем виде:

$$(\Pi N)_i = f_i \left( (\Pi N)_{i-1} \left( (\Pi N)_{i-2} \left( (\Pi N)_{i-3} \dots \left( (\Pi N)_{i-n} \right) \right) \right) \right). \quad (10)$$

Таким образом, программа нагружения на данном квазимонотонном этапе определяется не только характером воздействия инструмента на поверхностный слой детали и накопления деформации в данный момент времени, но всей историей изменения функции степени деформации сдвига от показателя схемы напряженного состояния (программы нагружения). Можно утверждать, что  $(\Pi N)_i$  есть функционал от истории нагружения, описываемой в категориях программ нагружения, т.е.:

$$(\Pi N)_i = F_{i-n}^{i-1}(\Pi N), \quad (11)$$

При разработке математической модели технологического наследования в категориях программ нагружения использованы представления о функционале наследственного типа (ФНТ) [26]. В качестве примера приведена одна из аналитических зависимостей, разработанных применительно к стадии ППД:

венно степень деформации сдвига и показатель схемы напряженного состояния в конце текущего квазимонотонного этапа нагружения.

При разработке аналитических моделей

стадии циклической долговечности исходили из того, что в каждом цикле усталостного нагружения имеют место несколько участков квазимонотонной деформации; по мере накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности, релаксации остаточных напряжений и уменьшения их влияния размах показателя схемы ДП в цикле возрастает; на старте циклического нагружения действуют только сжимающие остаточные напряжения от предшествующей стадии ППД, в процессе нагружения – остаточные и циклические напряжения, а на финише – после релаксации тензора остаточных напряжений – только циклические напряжения. Аналитически программа нагружения может быть описана функцией, схожей по структуре с функцией (9).

Установлено, что программа нагружения для стадии циклической долговечности (ПН)<sub>цд</sub> имеет те же особенности, что и на стадиях механической обработки резанием и ППД. Увеличение накопленной на стадиях механической обработки степени деформации сдвига приводит к смещению (ПН)<sub>цд</sub> в область «жестких» схем, т.е. в положительном направлении оси абсцисс, «сжатую» вдоль оси деформаций (ось ординат) и уменьшению скорости накопления деформации. Показано, что программа нагружения на стадии циклической долговечности является функционалом от истории нагружения, описываемой в категориях программ нагружения на стадиях механической обработки резанием и ППД, т.е.

$$(ПН)_{цд} = F_{i-n}^{i-1} (ПН)_{мех}. \quad (13)$$

Основой механики технологического наследования на стадии циклической трещиностойкости являются: параметры видимой (начальной) трещины (длина и глубина), координаты расположения и число циклов до ее появления зависят от наследуемого механического состояния детали на предшествующей стадии; основные параметры интенсивности напряжений (пороговый, критический и др.) и соответствующие им скорости роста трещины наследуются от стадий механической обработки и циклической долговечности; технологическое наследование проявляется в оценках пороговых и критических коэффициентов интенсивности напряжений, скорости роста трещин на этапе живучести, а также продолжительности каждого этапа стадии циклической трещиностойкости.

Итак, существует программа нагружения в некоторой малой пластической области в районе вершины (устье) трещины, описывающая накопление деформации в категориях программ нагружения. В качестве таковой предложена диаграмма предельных значений вязкости разрушения (диаграмма вязкости) в виде:

$$V_{fc} = a \cdot \exp(b \cdot K_{fc}), \quad (14)$$

где  $V_{fc}$  и  $K_{fc}$  – критическая скорость роста трещины и соответствующий этой скорости критический коэффициент интенсивности напряжений;  $a$  и  $b$  – параметры аппроксимации применительно к данному материалу. Данная диаграмма является огибающей предельных значений показателя вязкости разрушения для материалов с различной историей нагружения. Смысл этой диаграммы в том, что она может быть построена по результатам испытаний вязкости разрушения одного материала, но в разных структурных состояниях, либо, в наследственной постановке – имеющих различную историю нагружения. При этом диаграмма циклической трещиностойкости (ДЦТ) испытываемого материала находится под диаграммой вязкости разрушения, достигая ее только в момент долома образца.

*Технологическое наследование в механической трактовке* – это взаимодействие различных программ последовательного нагружения со все уменьшающимся очагом пластической деформации, когда накопление деформаций на каждом последующем этапе происходит в условиях более жестких схем нагружения, чем на предшествующем.

*История развития деформации* – общее свойство, описываемое в хронологии программ нагружения металла поверхностного слоя изделия.

*Технологическое наследование* – закономерность, характеризующая способность предшествующих программ нагружения оказывать влияние на формирование программ нагружения на последующих стадиях, и являющихся следствием определенной истории нагружения металла поверхностного слоя изделия.

*Выявленные механизмы позволяют выполнить расчет традиционных показателей качества поверхностного слоя с учетом технологического наследования в зависимости от вида программ нагружения на каждом этапе и накопленной деформации после каждой стадии нагружения.*

При этом глубина упрочнения определяется глубиной распространения пластической деформации, соответствующей нижней точке границы очага деформации. Степень упрочнения для каждого металла определяется по известным зависимостям твердости от интенсивности напряжения и интенсивности деформаций [27]. Расчет тензора остаточных напряжений на каждой стадии производится по ранее разработанной методике, исходя из наследуемой деформации в соответствии с теоремой о разгрузке [28 – 30].

Таким образом, разработана совокупность математических моделей, позволяющих по за-

данным технологическим и эксплуатационным воздействиям, базовым механическим свойствам материала прогнозировать накопление деформации и поврежденности металла поверхностного слоя в процессах изготовления и эксплуатации изделия.

Наличие таких моделей позволяет проводить аналитическое описание процессов и положить его в основу создания цифровых двойников. Цифровой двойник представляет собой совокупность моделей формы и материала изделия, моделей технологических и эксплуатационных воздействий.

Для корректного описания физико-механических процессов в конструкции при различных технологических и эксплуатационных воздействиях для каждого материала используется обширный набор параметров и характеристик, включая кривые упругопластического деформирования при различных скоростях деформирования, критерии начала разрушения, модели его развития, модели накопления повреждений и формирования остаточных напряжений в материалах и т.д.

При этом важнейшей особенностью, обуславливающей эффективность использования цифровых двойников, является их адекватность реальным процессам, протекающим в процессах изготовления и эксплуатации изделий.

### **О направлениях развития исследований в области технологического наследования**

К концу 1990-х – началу 2000-х г.г. становится очевидным, что традиционный макро- и микроинструментарий исследований качества поверхностного слоя в наследственной постановке исчерпал себя. Это существенно затрудняло получение новых знаний и закономерностей поведения металла под нагрузкой. В настоящее время актуальны исследования в области физики металлов и кристаллографии, позволяющие получать уникальные знания, развивать эволюционные представления о пластической деформации и кристаллических структурах материалов.

Пластическое течение металлических материалов, возникающее вследствие тех или иных внешних воздействий, является сложным явлением, которое может рассматриваться как коллективный процесс, в ходе которого генерируются, закономерно эволюционируют и уничтожаются различного типа и сложности носители пластичности.

Носители пластичности характеризуются некоторым набором специфических радиусов корреляции (масштабов), в соответствии с которыми выделяются, как правило, носители микро-, мезо- и макроуровня [31 – 32]. Возникновение и развитие пластического течения происходит, как правило, последовательно.

Вначале протекают процессы на микроуровне, затем, по мере накопления определенной деформации, включаются механизмы на мезоуровне – возникают, перемещаются и сливаются волны пластической деформации, происходит локализация на макроуровне, что приводит к пластическому течению на макроуровне.

В процессе возникновения и развития пластической деформации первоначально однородная среда самопроизвольно сепарируется на деформируемые и недеформируемые объемы, границы которых могут быть подвижными. Очевидно, что в зонах локализации и между ними пластическая деформация развивается по-разному.

В связи с этим нагружаемое тело рассматривается как самоорганизующаяся система. Под самоорганизацией здесь понимается «приобретение системой пространственной временной или функциональной неоднородности без специфического воздействия извне». Проявляется самоорганизация в виде возникновения неоднородности пластического течения даже при равномерном и однородном внешнем воздействии. В результате возникают макроскопические паттерны локализованной деформации, которые имеют автоволновой характер. Картины распределения таких паттернов эволюционируют в соответствии с законом деформационного упрочнения материала (кривой нагружения) и продолжением действия внешних воздействий.

При этом важным является наследственный характер происходящих явлений локализации пластической деформации. Установлено, что формы локализации только в количественном смысле зависят от структуры и типа кристаллической решетки исследуемого материала, а их качественный тип полностью определяется действующими на соответствующей стадии законами деформационного упрочнения материала.

Для корректного описания пластического течения были введены представления о нелинейности деформируемой среды. Это вполне естественно по отношению к деформируемой среде, поскольку кристалл «запоминает» все, что происходит в нем при напряжениях выше предела текучести (упругости) за счет необратимых изменений дефектной структуры. Такая нелинейность деформируемой твердой среды проявляется сразу по достижении предела текучести и обычно выражается в том, что свойства деформируемого материала в значительной степени определяются его предысторией и дефектной подсистемой, возникшей на предыдущих этапах процесса деформирования.

В заключение отметим, что в области кристаллофизики важнейшие достижения демонстрирует А.Р. Оганов [33 – 35]. Автор разработал и использует эволюционный, а, по мне-

нию ряда физиков, революционный алгоритм для прогнозирования и формирования новых уникальных структур кристаллов. Согласно алгоритму, кристаллическая структура оценивается с позиций энергетического состояния. Эволюционные расчеты «самообучаются» и фокусируют поиск на наиболее интересных областях пространства. Существуют области с низкими энергиями и с высокими энергиями. Выполняется случайное прощупывание очень редкой сеткой всей области поиска; наиболее выгодная область – это низкая энергетическая область. Далее выполняется поиск и нахождение самой устойчивой структуры. Важно одно – чтобы рецепт «произведения детей от родителей» был физически обоснован, чтобы это был строгий и интуитивно правильный подход.

*По мнению А.Р. Оганова, «есть несколько способов произведения детей из родителей – это либо наследственность, когда элементы двух родителей, отца и матери, комбинируются, и таким образом производится ребенок, либо же это разного рода мутации».*

На современном этапе развития научных знаний такие подходы позволяют получать принципиально новые знания и закономерности и использовать их для создания новых уникальных материалов, технологий и изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломин, В.П., Воробейков, Г.А. К. Линней ботаник, зоолог, врач и педагог // Фило-софский век. Альманах. – СПб.: Санкт-Петербургский центр истории идей. – 2007. – Вып. 33. – С.15-22.
2. Дарвин, Ч. Происхождение видов путем естественного отбора. – М.: Просвещение. – 1986. – 383 с.
3. Гуреев, А.С., Кухарский, М.С., Новиков, Ю.М. Жан-Батист Деламарк. Первая теория эволюции в свете новых достижений общей биологии // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2009. – № 4 (8). – С. 112-119.
4. Суховерхов, А.В. Негенетические системы наследования и новый эволюционный синтез // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 397. – С. 60-64.
5. Цой, Р.М. Индуцированный мутагенез и мутационная селекция прудовых рыб: дис-сертация ... д-ра биол. наук: 03.00.15. – Алма-Ата, – 1984. – 313 с.
6. Кирпичников, В.С. Генетические основы селекции рыб. – Л.: Наука. – 1987. – 391 с.
7. Катасонов, В.Я. Селекция и племенное дело в рыбодоводстве / В.Я. Катасонов, Н.Б. Черфас. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 168 с.
8. Кирпичников, В.С. Генетические исследования рыб в СССР и за рубежом // Биоло-гические основы рыбоводства: проблемы генетики и селекции.– 1983. – С. 7-22.
9. Крыжановский, О.А. Зависимость эффекта гетерозиса от комбинационной способности линий. Селекция рыб. / О.А. Крыжановский, Н.И. Маслова– 1989. – М.: Агро-промиздат. – С. 86-92.
10. Слуцкий, Е.С. Фенотипическая изменчивость рыб (селекционный аспект) // Изв. Гос. НИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва. – 1978. – Т. 134. – С. 3-132.
11. Смирнов, Е.В., Некрасова, О.Л. Проявление гетерозиса в садках на теплых водах // Сб. научн. трудов ГосНИОРХ. – 1986. – Вып. 254. – С. 87-94.
12. Струнников, В.А. Возникновение компенсационного комплекса генов – одна из причин гетерозиса // Журнал общей биологии. – 1974. – Т. 35. – Вып. 5. – С. 666-677.
13. Законнова, Л.И. Разработка стратегии селекции тепловодного беловского карпа на этапе стабилизирующего отбора // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 10 (часть 3). – С. 581-585; URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=7981491](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7981491) (дата обращения: 02.11.2011).
14. Ратнер, В.А. Сайзеры: моделирование фундаментальных особенностей молекулярно-биологической организации / Ратнер В.А., Шамин В.В. // Математические модели эволюционной генетики – Новосибирск: ИЦиГ СО АН СССР. –1980. –С. 66-91.
15. Юрченко, Н.Н., Дейнеко, И.В., Захаров, И.К. Модели в эволюционной биологии // Вестник ВОГиС. – 2009. – Т.13. – № 22. – С. 372-383.
16. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1975. – 223 с.
17. Ящерицын, П.И., Рыжов, Э.В., Аверченков, В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск: Наука и техника. – 1977. – 256 с.
18. Соколовский, А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машгиз. – 1955. – 515 с.
19. Кован, В.М. Расчет припусков на обработку в машиностроении. Справочное пособие. – М.: Машгиз. –1953. –210 с.
20. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. – Минск: Наука и техника. – 1971. – 210 с.
21. Дальский, А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ. – 2000. – 364 с.
22. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. – 2000. – 320 с.
23. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн. – М.: Машиностроение-1. – 2007. – 400 с.
24. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.] / под общ. ред. М.Л. Хейфеца. – Минск : Беларуская навука. – 2019. – 248 с.
25. Кречетов, А.А. Методика расчета параметров механического состояния поверхностного слоя деталей машин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2001. – № 5 (24). – С. 27-31.
26. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
27. Дель, Г.Д. Технологическая механика. – М.: Машиностроение. 1978. с 174 с.
28. Махалов, М.С., Блюменштейн, В.Ю. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий // Вестник машиностроения.– 2014. – №12. – С. 21-25.
29. Mahalov, M.S., Blumenstein, V.Yu. Finite Element Surface Layer Inheritable Condition Residual Stresses Model In Surface Plastic Deformation Processes / M. S. Mahalov, V. Yu. Blumenstein // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. –P. 012004.
30. Mahalov, M.S., Blumenstein, V.Yu. The Surface Layer Mechanical Condition and Residual Stress Forming Model in Surface Plastic Deformation Process with the Hardened Body Effect Consideration / M. S. Mahalov, V. Yu. Blumenstein. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 253. – P. 012009.

31. Зуев, Л.Б., Данилов, В.И., Баранникова, С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
32. Зуев, Л.Б., Баранникова, С.А., Лунев, А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации. – Новосибирск: Наука, 2018. – 132 с.
33. Oganov, A.R. Modern Methods of Crystal Structure Prediction // Wiley-VCH. – 2010.
34. Oganov, A.R., Glass, C.W. Crystal Structure Prediction using ab initio evolutionary technique: Principles and applications // The Journal of Chemical Physics. – 2006. – Vol. 124. – No. 24. – Topic 47. – Doc. 04.
35. Oganov, A.R., Liakhov, A.O., Valle, M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works – and Why // Accounts of Chemical Research. – 2011. – Vol. 44. – No. 3. – P. 227-237.

## REFERENCES

1. Solomin, V.P., Vorobeinikov, G.A. K. Linnaeus – botanist, zoologist, doctor and pedagogue // *Philosophical Century. Almanac.* – S-Pb.: Saint-Petersburg Center of Idea History. – 2007. – Issue 33. – pp. 15-22.
2. Darwin, C. *Origin of Species by Means of Natural Selection.* – M.: Prosveshchenie. – 1986. – pp. 383.
3. Gureev, A.S., Kukharsky, M.S., Novikov, Yu.M. Jean-Baptiste de Lamarck. First theory of evolution in light of new achievements of general biology // *Bulletin of Tomsk State University. Biology.* – 2009. – No.4 (8). – pp. 112-119.
4. Sukhoverkhov, A.V. Non-genetic systems of inheritance and new evolutionary synthesis // *Bulletin of Tomsk State University.* – 2015. – No.397. – pp. 60 – 64.
5. Tsoy, R.M. *Induced Mutagenesis and Mutational Selection of Pond Fish:* thesis for Dr. Sc. Biolog. Degree: 03.00.15. – Alma-Ata, - 1984. – pp. 313.
6. Kirpichnikov, V.S. *Genetic Fundamentals of Fish Selection.* – L.: Science. – 1987. – pp. 391.
7. Katasonov, V.Ya. *Selection and Breeding in Pisciculture* / V.Ya. Katasonov, N.B. Cherfas. – M.: Agropromizdat. – 1986. – pp. 168.
8. Kirpichnikov, V.S. Fish genetic investigations in the USSR and abroad // *Biological Fundamentals of Pisciculture: Problems of Genetics and Selection.* – 1983. – pp. 7-22.
9. Kryzhanovskiy, O.A. *Geterosis Effect Dependence upon Combination Ability of Lines. Fish Selection.* / O.A. Kryzhanovskiy, N.I. Maslova – 1989. – M.: Agropromizdat. – pp. 86-92.
10. Slutsky, E.S. Phenotypic variability of fish (selection aspect) // *Proceedings of State RI of Lakes and River Fish Industry.* – 1978. – Vol. 134. – pp. 3-132.
11. Smirnov, E.V., Nekrasova, O.L. Heterosis manifestation in warm water fishes // *Proceedings of State RIFI.* – 1986. – Issue 254. – pp. 87-94.
12. Strunnikov, V.A. Compensation complex generation of genes – one of reasons of heterosis // *Journal of General Biology.* – 1974. – Vol. 35. – Issue 5. – pp. 666-677.
13. Zakonnova, L.I. Strategy development for selection of warm-water Belov carp at the stage of stabilizing selection // *Fundamental Investigations.* – 2011. – No.10 (Part 3). – pp. 581-585; URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=7981491](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7981491) (address date: 02.11.2011.).
14. Ratner, V.A. Sizers: modeling of fundamental peculiarities of molecular-biological organization / Ratner V.A., Shamin V.V. // *Evolutionary Genetics Simulators* – Novosibirsk: ITsiG SB AS of the USSR. – 1980. – pp. 66-91.
15. Yurchenko, N.N., Deineko, I.V., Zakharov, I.K. Models in evolutionary biology // *Bulletin of VOG&S.* – 2009. –

Vol.13. – No.22. – pp. 372-383.

16. Dalsky, A.M. *Technological Support of Precise Machinery Reliability.* – M.: Mechanical Engineering. – 1975. – pp. 223.
17. Yashcheritsyn, P.I., Ryzhov, E.V., Averchenkov, V.I. Technological inheritance in mechanical engineering. – Minsk: *Science and Engineering.* – 1977. – pp. 256.
18. Sokolovsky, A.P. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique.* – M.: Machgiz. – 1955. – pp. 515.
19. Kovan, V.M. *Machining Allowance Calculation in Mechanical Engineering.* Reference Book. – M.: Machgiz. – 1953. – pp. 210.
20. Yashcheritsyn, P.I. Technological inheritance and parts operation properties. – Minsk: *Science and Engineering.* – 1971. – pp. 210.
21. Dalsky, A.M. *Technological Inheritance in Engineering Industry* / A.M. Dalsky, B.M. Bazrov, A.S. Vasiliev et al. / under the editorship of A.M. Dalsky. – M.: MAI Publishers. – 2000. – pp. 364.
22. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer.* – M.: Mechanical Engineering. – 2000. – pp. 320.
23. Blumenstein, V.Yu. *Mechanics of Technological Inheritance at Stages of Machinery Processing and Operation* / V.Yu. Blumenstein. – M.: Mechanical Engineering-1. - 2007. – pp. 400.
24. *Product Quality Support in Technological Complexes* / S.A. Chizhik [et al.] / under the general editorship of M.L. Heifets. – Minsk: Belorussian Science. – 2019. – pp. 248.
25. Krechetov, A.A. Procedure for mechanical state calculation of surface layer in machinery // *Bulletin of Kuzbass State Technical University.* – 2001. – No.5(24). – pp. 27-31.
26. Rabotnov, Yu.N. *Mechanics of Deformable Solid* / college manual, 2-d edition revised. – M.: Science, 1988. – pp. 712.
27. Del, G.D. *Technological Mechanics.* M.: Mechanical Engineering. 1978. – pp. 174.
28. Makhalov, M.S., Blumenstein, V.Yu. Modeling of residual stresses at stages of product life // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2014. – No.12. – pp. 21-25.
29. Mahalov, M.S., Blumenstein, V.Yu. Finite Element Surface Layer Inheritable Condition Residual Stresses Model In Surface Plastic Deformation Processes / M. S. Mahalov, V. Yu. Blumenstein // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. –P. 012004.
30. Mahalov, M.S., Blumenstein, V.Yu. The Surface Layer Mechanical Condition and Residual Stress Forming Model in Surface Plastic Deformation Process with the Hardened Body Effect Consideration / M. S. Mahalov, V. Yu. Blumenstein. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 253. – P. 012009.
31. Zuev, L.B., Danilov, V.I., Barannikova, S.A. *Physics of Plastic Flow Macrolocalization.* – Novosibirsk: Science, 2008. – pp. 327.
32. Zuev, L.B., Barannikova, S.A., Lunev, A.G. *From Macro to Micro. Plastic Deformation Scales.* – Novosibirsk: Science, 2018. – pp. 132.
33. Oganov, A.R. Modern Methods of Crystal Structure Prediction // Wiley-VCH. – 2010.
34. Oganov, A.R., Glass, C.W. Crystal Structure Prediction using ab initio evolutionary technique: Principles and applications // The Journal of Chemical Physics. – 2006. – Vol. 124. – No. 24. – Topic 47. – Doc. 04.
35. Oganov, A.R., Liakhov, A.O., Valle M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works – and Why // Accounts of Chemical Research. – 2011. – Vol. 44. – No. 3. – P. 227-237.

Рецензент д.т.н. А.Н. Смирнов