



Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании

В.Ф. Безъязычный¹, Е.В. Шеховцева^{2✉}, Т.В. Шеховцева³

^{1,3}Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

²ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия

Резюме. Цель – разработать комплексную модель, учитывающую взаимосвязь между конструкцией зубчатого колеса, свойствами материала и технологическими параметрами обработки. Данная модель должна предсказывать эксплуатационные характеристики колеса, учитывая воздействие как внутренних, так и внешних факторов. Для определения механических характеристик металла были проведены механические испытания с помощью электромеханического разрывного оборудования фирмы Tinius Olsen марки H100KU. Контроль механических показателей материала (предел прочности, предел текучести и др.) с нагрузкой более 100 Н/мм² выполнялись на свидетелях по ГОСТ 1497-84. Контроль механических характеристик металла производился после каждой операции. Были исследованы изменения механических характеристик сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А-Ш для различных заготовок и видов обработки (формование металла давлением, механическая и абразивная обработки, химико-термическая и термическая обработки). Анализ механических характеристик металла показал существенные различия в твердости, прочности и пластичности образцов, полученных разными способами. Показано, что эти различия обусловлены микроструктурой материала (размер зерна, наличие включений, степень деформации), формирующейся в процессе обработки. Анализ был выполнен по следующим параметрам: коэффициенту технологической наследственности и структурной наследственности. Установлено, что наследование механических свойств материала (способом получения заготовки) обработкой давлением с последующей термической обработкой относительно сортового проката с аналогичной термообработкой характеризуется положительной тенденцией и составляет по пределу прочности прирост до 6,2%, по пределу текучести – до 5,3%. Показано, что прирост количественного показателя по коэффициенту структурной наследственности после химико-термической обработки относительно операции шлифования по упрочненному слою составляет по пределу прочности не менее 49%, по пределу текучести – не менее 68%. Разработанная многомерная модель взаимодействия зубчатых колес учитывает множество факторов, влияющих на их работу: свойства материала, температурные поля в зоне контакта зубьев, динамические нагрузки, воздействие смазочного материала.

Ключевые слова: зубчатое колесо, механические свойства материала и их направленное формирование, технологическое наследование

Благодарности. Авторы благодарят заместителя начальника цеха М.С. Мариеву, кандидата технических наук И.В. Полякова и коллектив специалистов ПАО «ОДК-Сатурн» за многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Для цитирования: Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 160–169. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-160-169>. EDN: OSCDVC.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Inheritance of mechanical properties of a material during directed formation

Vyacheslav F. Bezzyazhnyi¹, Evgenia V. Shekhovtseva^{2✉}, Tatiana V. Shekhovtseva³

^{1,3}P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia

²Public joint stock company “UEC - Saturn”, Rybinsk, Russia

Abstract. Objective – development of a comprehensive model that takes into account the interrelationship between the structure of a gear wheel, material properties and technological processing parameters. This model should predict the operational characteristics of the wheel, considering the impact of both internal and external

factors. Mechanical testing was conducted using electromechanical tensile testing equipment from Tinius Olsen, model H100KU, to determine the mechanical properties of the metal. Samples in compliance with GOST 1497-84 were used for monitoring material properties (tensile strength, yield strength, etc.) at loads above 100 N/mm². The mechanical properties of the metal were monitored after each processing operation. The mechanical properties of the steels 16Kh3NVFMB-Sh, 20Kh3MVF-Sh, 18Kh2N4MA and 12Kh2N4A-Sh were investigated for different blanks and types of treatment (pressure forming, mechanical and abrasive, thermochemical and heat treatment). Analysis of the mechanical properties of the metal revealed significant differences in hardness, strength and ductility between samples obtained by different methods. It was shown that these differences are due to the microstructure of the material (grain size, presence of inclusions, degree of deformation) formed during processing. The analysis was based on parameters including the coefficient of technological inheritance and structural inheritance. It was found that the inheritance of the mechanical properties of the material through pressure working followed by heat treatment shows a positive trend relative to rolled material with similar heat treatment. This method results in an increase in tensile strength of up to 6.2% and in yield strength of up to 5.3%. Furthermore, it was shown that the increase in the quantitative indicator of structural inheritance after thermochemical treatment, relative to grinding of the hardened layer, is at least 49% for tensile strength and at least 68% for yield strength. The developed multidimensional model of gear interaction takes into account a wide range of factors that influence its operation, including material properties, temperature fields in the contact zone of the tooth, dynamic loads and the effect of lubricant.

Keywords: gear, material mechanical properties and their directional formation, technical inheritance

Acknowledgements. The authors thank the Workshop Deputy Head M.S. Marieva, Candidate of technical sciences I.V. Polyakov and the team of specialists of the Public joint stock company "UEC-Saturn" for long-term and fruitful cooperation.

For citation: Bezyazychnyi V.F., Shekhovtseva E.V., Shekhovtseva T.V. Inheritance of mechanical properties of a material during directed formation. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):160-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-160-169>. EDN: OSCDVC.

ВВЕДЕНИЕ

Механика технологического наследования – это процесс преобразования свойств обрабатываемого объекта от предыдущих операций технологии к следующим. Механическая система технологического наследования учитывает особенности вида обработки, свойства материалов и воздействия различных факторов технологических процессов обработки [1]. Поверхностный слой материала детали, подверженный значительным механическим воздействиям, также является носителем «памяти» о предшествующих операциях [2–4]. Изменения в его структуре, например, образование упрочненного слоя в результате обработки, влияют на выносливость и долговечность изделия [5–7]. Жесткость системы (сопротивление деформациям) всех элементов технологической системы (оборудование, инструмент, заготовка, приспособления) прямо влияет на точность обработки [8–10]. Это наглядно демонстрирует механизм технологического наследования – погрешности «наследуются» из предыдущей стадии обработки [11–13]. Однако в современных условиях, когда требования к качеству изделий значительно выросли, нужно учитывать не только геометрическую точность, но и целый комплекс свойств качества изделия [14–16]. Современные исследования техно-

логического наследования включают изучение влияния различных факторов: способы обработки и их параметры, используемый инструмент, механические характеристики материала заготовки, а также ее структурное состояние. Более точное прогнозирование изменения свойств материала и конфигурации детали на каждом этапе обработки позволяет оптимизировать технологический процесс и минимизировать негативное влияние технологического наследования. Следовательно, технологическое наследование – это сложный многофакторный процесс, требующий комплексного подхода к его исследованию и управлению. Все это обосновывает актуальность изучения технологического наследования для обеспечения качества и надежности современных изделий [17–19].

Технологическое наследование проявляется как множество положительных и отрицательных факторов, передающихся от одной операции к другой. Это достигается за счет целенаправленного выбора операций в технологии изготовления, которая бы минимизировала влияние отрицательных и усиливала влияние положительных факторов наследования. Суть стратегии – создание технологических «барьеров», препятствующих передаче негативных свойств на последующие стадии обработки.

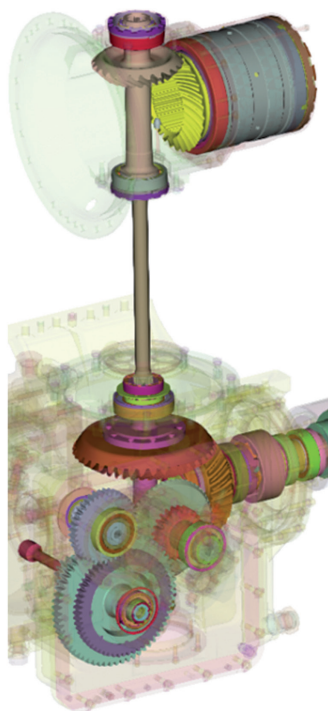


Рис. 1. Типовая кинематическая схема приводов
Fig. 1. Typical kinematic diagram of drives

Зубчатые передачи редукторов газотурбинных двигателей (ГТД) функционируют в условиях высоких нагрузок и температур. По конструктивному и технологическому фактору зубчатые колеса относятся к сложным деталям двигателя. Технология их изготовления, ее построение и ряд операций формируют несущую способность зубчатой передачи. В связи с этим изучение связей технологического наследования при производстве зубчатых колес, их влияния на качество готовых деталей является актуальной научной задачей в области машиностроительной технологии. Одним из важнейших направлений выступает исследование влияния различных способов обработки на механические свойства материала, используемых для изготовления зубчатых колес, которые обладают уникальными свойствами и могут быть оптимизированы в процессе обработки. Трансформация свойств не случайна и подчиняется принципу технологического наследования – концепции, утверждающей, что качество конечного продукта определяется не только финальными операциями, но и всеми предшествующими стадиями обработки. Таким образом, каждая операция оставляет свой «отпечаток» на материале, накапливая изменения в его структуре и свойствах. Изначаль-

ные характеристики полуфабриката, такие как макро- и микроструктура, химический состав (включая легирующие элементы и примеси) и вытекающие из них механические свойства (предел текучести, предел прочности, твердость, ударная вязкость, пластичность и т.д.), закладывают основу для дальнейших преобразований. Важно понимать, что даже незначительные вариации в исходном материале могут привести к существенным различиям в конечных свойствах детали. Для управления сложной цепочкой преобразований, оказывающих существенное воздействие на конечные механические свойства и прочностные характеристики детали, необходимо глубокое понимание принципов технологического наследования.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проблема обеспечения контактной выносливости зубчатых передач (рис. 1) является одной из ключевых задач в машиностроении. Долговечность и надежность работы таких передач напрямую зависят от способности зубьев выдерживать значительные контактные напряжения, возникающие при передаче крутящего момента. Повреждение поверхности зубьев, ведущее к выкрашиванию, усталостному излому или задирам, приводит к преждевременному выходу передачи из строя и, как следствие, к дорогостоящим простоям и ремонтам. Поэтому разработка методов управления работоспособностью рабочих поверхностей зубчатых колес – задача первостепенной важности. Решение этой задачи требует обобщенного подхода, включающего применение технологического наследования при формировании технологических процессов изготовления. Механические свойства материала зубчатого колеса, такие как твердость, предел текучести и прочности, оказывают существенное влияние на его контактную выносливость. Например, использование высокопрочных сталей с легирующими добавками, повышающими износостойкость, позволяет значительно увеличить срок службы передачи. Однако даже самый высококачественный материал не гарантирует высокой надежности, если технологический процесс изготовления выполнен некорректно. Технологические факторы, такие как качество поверхности зубьев (шероховатость, наличие микротрещин), точ-

ность обработки и термическая обработка, также принципиально важны. Шероховатая поверхность способствует возникновению концентраторов напряжений, ускоряющих процесс разрушения. Неправильный выбор режимов термообработки может привести к изменению структуры материала и снижению его механических свойств. Поэтому контроль качества на всех этапах производства, от заготовки до окончательной сборки, является необходимым условием обеспечения высокой контактной выносливости.

Испытания на растяжения применялись для исследования механических свойств сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А-Ш. Испытания проводились на электромеханическом разрывном оборудовании фирмы Tinius Olsen марки H100KU. Процесс испытания начинается с фиксации цилиндрического образца в специальных зажимах. Один зажим жестко соединен с основанием машины, а другой – с подвижной траверсой с датчиком. Движение траверсы вверх осуществляется с контролируемой скоростью не более 20 мм/мин. В ходе испытания программное обеспечение непрерывно регистрирует как величину приложенной силы, так и величину удлинения образца. Это позволяет построить диаграмму «напряжение – деформация», которая содержит ключевую информацию о механических свойствах материала. Анализируя эту диаграмму, определяют основные характеристики – предел прочности (σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и другие.

Контроль механических свойств материала (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , E , $\sigma_{пл}$) с нагрузкой более 100

Н/мм² проводится на образцах-свидетелях (рис. 2) по ГОСТ 1497-2023⁴ (приложение Б, тип IV). Исследования механических свойств материала проводились после каждой операции технологического процесса согласно серийным технологиям изготовления зубчатых колес.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применено моделирование для анализа механики технологической наследственности (рис. 3) [20].

Технология изготовления в совокупности с условиями эксплуатации представлена как модульная многофакторная система, где на входе – характеристики детали и условия ее работы (материал, нагрузка, тепло), а на выходе – характеристики готовой детали и эксплуатационные свойства (структура, механические свойства, прочностные показатели). Технологические операции моделируются как преобразование входных параметров с учетом технологических факторов (химико-термическая обработка, структурное строение). Рабочие условия моделируются как преобразование входных параметров с учетом эксплуатационных факторов (рабочая среда, механизм нагружения и т.д.).

Многомерная модель демонстрирует тесную связь между поверхностным слоем, сердцевиной материала, механическими свойствами и усталостной прочностью рабочих поверхностей. Здесь ключевую роль играют технологическое наследование ме-

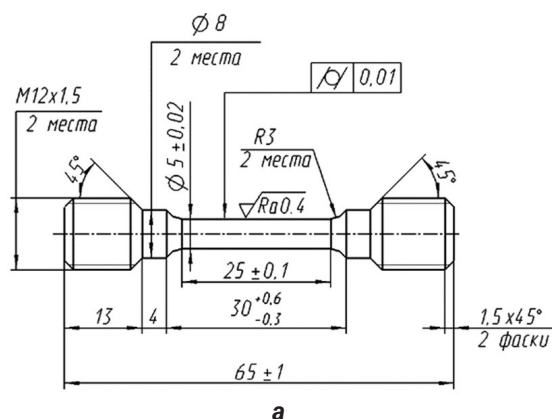


Рис. 2. Пропорциональный цилиндрический образец-свидетель: а – эскиз образца; б – образец-свидетель
Fig. 2. Proportional cylindrical witness sample: а – sample diagram; б – part-sample

⁴ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.07.2024. М.: Российский институт стандартизации, 2024.

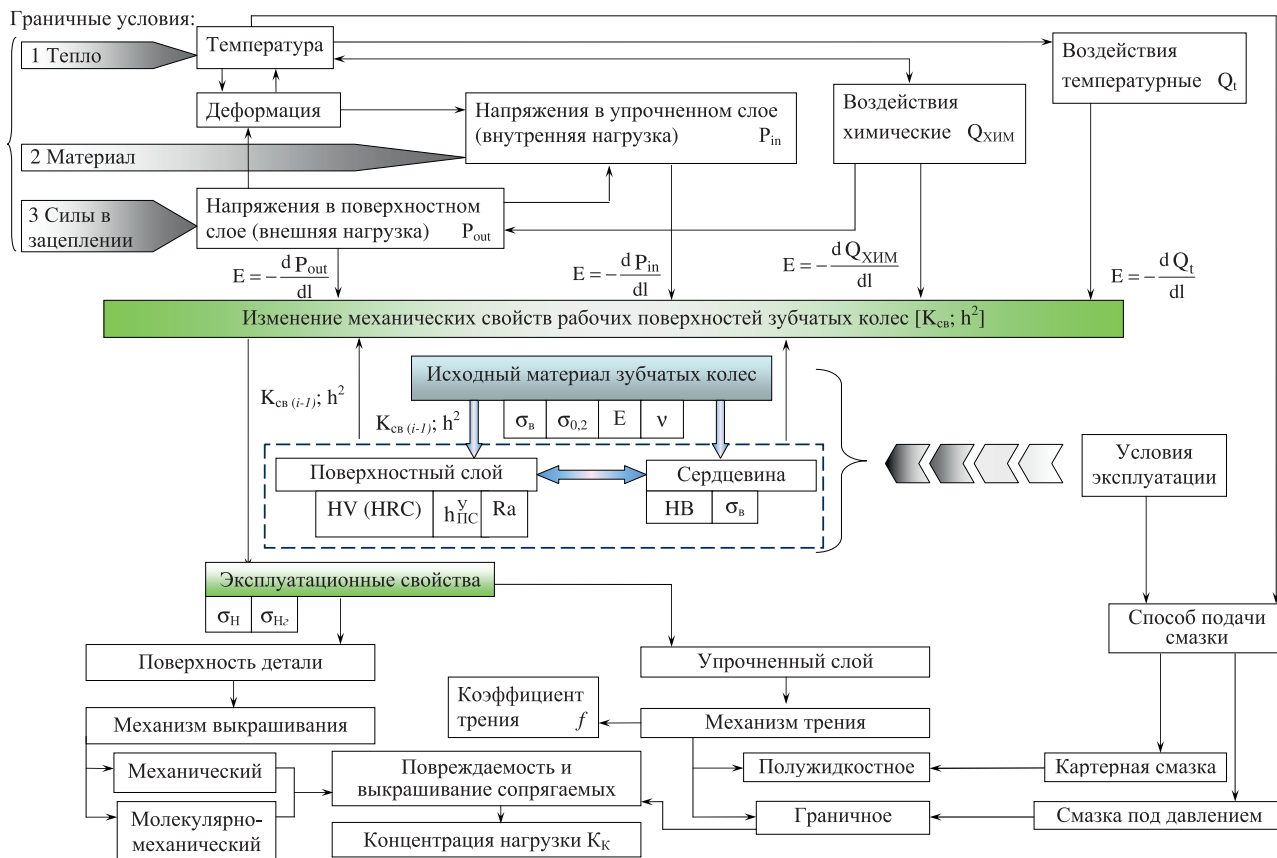


Рис. 3. Модель механики технологической наследственности

Fig. 3. Model of technical inheritance mechanics

ханических свойств материала и величина наследственного зерна от заготовки (штамповки) до готового зубчатого колеса. Задача состоит в получении оптимальной структуры, включающей пластичную сердцевину, обеспечивающую вязкость, и твердый поверхностный слой, гарантирующий высокую износостойкость и сопротивление контактным напряжениям. Технология изготовления зубчатых колес является сложным процессом, базирующимся на принципах технологического наследования. Многомерная модель формирует предпосылки для необходимости количественной оценки влияния каждой операции технологического процесса на формирование поверхностного слоя и сердцевины, а, следовательно, и на эксплуатационные параметры готовой детали.

При проектировании технологического процесса важнейшую роль играет механика технологического наследования, позволяющая спрогнозировать изменение структуры и свойств материала на каждом этапе обработки. Учет наследственных связей между структурой материала, размером зерна и

механическими свойствами на всех этапах производства реализуется через коэффициенты технологической наследственности (K_{cb}) [20] и структурной наследственности (h^2) [1], что соответствует принципам технологического наследования:

$$K_{cb} = \frac{C_i}{C_{i-1}}, \quad (1)$$

где K_{cb} – коэффициент технологической наследственности; C_i – значение на текущей операции; C_{i-1} – значение на предшествующей операции (исходное состояние – прутки):

$$h^2 = \frac{\sigma_{i-1}^2}{\sigma_{i-1}^2 + \sigma_i^2}, \quad (2)$$

где h^2 – коэффициент структурной наследственности; σ_{i-1}^2 – дисперсия на предшествующей операции; σ_i^2 – дисперсия на текущей операции.

Значение коэффициента K_{cb} больше единицы указывает на улучшение свойств (на-

пример, увеличение прочности после термической обработки), значение меньше единицы – на ухудшение (например, снижение пластичности), а равное единице значение свидетельствует об отсутствии значимых изменений. Анализ коэффициентов наследования для каждой операции позволяет идентифицировать «узкие места» в технологическом процессе, где происходит наиболее существенное ухудшение свойств материала. Это позволяет целенаправленно корректировать параметры технологических операций для повышения качества готовой детали. Например, если после операции шлифования коэффициент наследования твердости меньше единицы, это может указывать на избыточное нагревание материала, приводящее к снижению твердости поверхностного слоя. В этом случае оптимизация параметров шлифования (скорость вращения, подача, охлаждение) может улучшить твердость и повысить износостойкость детали. Или, если после операции закалки коэффициент наследования ударной вязкости меньше единицы, можно подобрать оптимальный режим термической обработки для минимизации хрупкости материала. Кроме того, анализ коэффициентов наследования позволяет оценить влияние различных факторов на технологическую наследственность, таких как тип оборудования, квалификация персонала, точность настройки параметров технологических операций, а также вариации в свойствах исходного материала. Это способствует разработке более эффективных и надежных технологических

процессов, обеспечивающих стабильное качество готовой продукции.

Экспериментальные исследования параметров материала 18Х2Н4МА (табл. 1) наглядно демонстрируют возможности для оптимизации технологии изготовления зубчатых колес на основе механики технологического наследования (табл. 2).

На основе экспериментов установлено, что наследование механических свойств материала (способом получения заготовки) обработкой давлением с последующей термической обработкой относительно сортового проката с аналогичной термообработкой характеризуется положительной тенденцией и составляет по пределу прочности (σ_B) прирост до 6,2%, по пределу текучести ($\sigma_{0,2}$) – до 5,3%. Проработка механических свойств материалов была сделана с акцентом на структурное строение детали, что позволяет более точно оценить влияние различных видов обработки на характеристики конечного продукта. Коэффициент структурной наследственности варьируется от нуля до единицы, где более высокие значения этого коэффициента указывают на более выраженные свойства наследственности. Это означает, что чем выше значение h^2 , тем больше влияние текущего этапа обработки на конечные механические свойства детали (рис. 4–5).

На рис. 4 и 5 приведены следующие сокращения: ТО – термическая обработка; ХТО – химико-термическая обработка; У – упрочненный слой; С – сердцевина материала;

Таблица 1. Свойство материала 18Х2Н4МА
Table 1. Property of 18Х2Н4МА material

Наименование операции		Механические свойства	
Заготовительная	термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	–	1002,3	1166
Поковка		1020,3	1181,9
Штамповка		1032,2	1199,6
Прутки сортовой	нормализация и высокий отпуск	847,5	957
Поковка		897,3	1026,3
Штамповка		920,2	1045,6

Таблица 2. Коэффициент наследования свойств материала 18Х2Н4МА на заготовительной операции
Table 2. Inheritance coefficient of 18Х2Н4МА material properties during blanking

Наименование операции		Коэффициент наследования K_{CB} по	
Заготовительная	термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	нормализация и высокий отпуск	0,846	0,821
Поковка		0,879	0,868
Штамповка		0,891	0,872

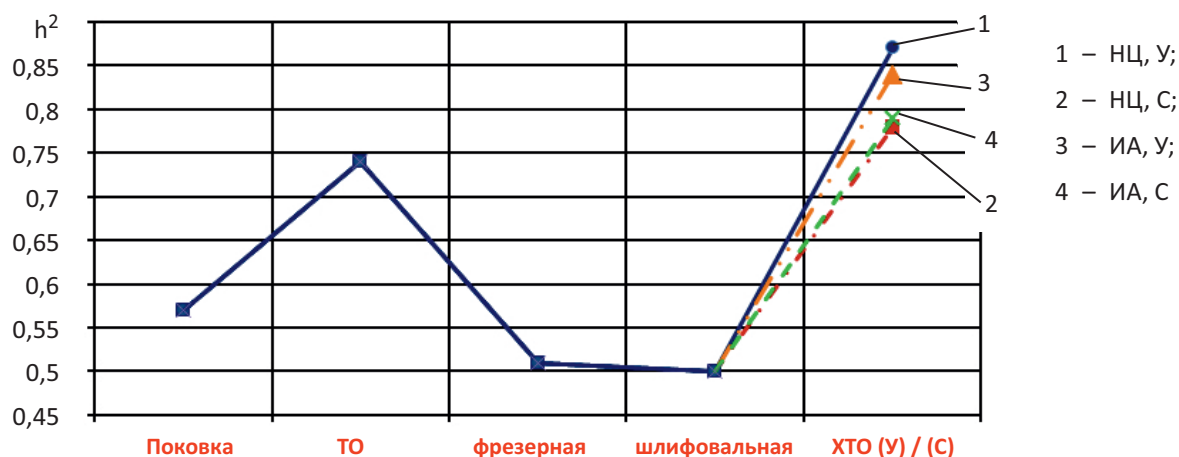


Рис. 4. Распределение коэффициента структурного наследования предела текучести

Fig. 4. Distribution of the yield strength structural inheritance coefficient

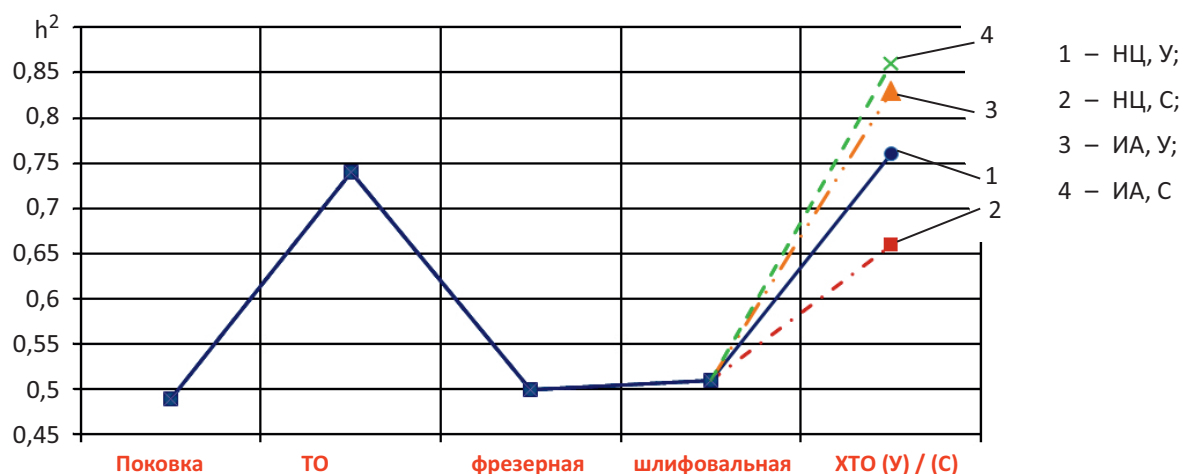


Рис. 5. Распределение коэффициента структурного наследования предела прочности

Fig. 5. Distribution of the tensile strength structural inheritance coefficient

НЦ – нитроцементация; ИА – ионное азотирование.

Анализ коэффициента структурной наследственности доказал наличие направленного формирования полезных качеств материала при таких операциях, как термическая и химико-термическая обработка. Например, прирост количественного показателя по коэффициенту структурной наследственности после ХТО относительно операции шлифования по упрочненному слою составляет по пределу прочности (σ_B) не менее 49%, по пределу текучести ($\sigma_{0.2}$) – не менее 68%. Изменения коэффициента структурной наследственности после ХТО относительно термической операции по сердцевине по пределу прочности и пределу текучести не превышают 10%. Механическая обработка не вносит вклада в механические характеристики материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная многомерная модель механики технологической наследственности механических свойств материала жизненного процесса зубчатой передачи аргументирует возможность управления механическими свойствами материала, позволяя учесть параметры поверхностного слоя и сердцевины материала исходя из технологической наследственности изготовления детали.

Экспериментально доказано, что количественные признаки формируются в процессе изготовления на основе технологической и структурной наследственности, отталкиваясь от факторов технологии. Степень влияния технологии на наследование разных свойств неодинакова.

Эмпирически установлено изменение коэффициента структурной наследствен-

ности механических свойств материала ли – более 30% показателя относительно готового зубчатого колеса, которое составляет для упрочненного поверхностного слоя более 50%; для сердцевины детали – более 30% показателя относительно состояния поставки при наибольшем влиянии термической и химико-термической обработки.

Список источников

1. Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Законнова Л.И. Анализ механизмов наследования в живой природе и технике // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 11. С. 16–29. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-16-29>. EDN: NQTYXQ.
2. Медеяев И.А. Технологическая мутационная наследственность при смазывании деталей машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 3. С. 116–120. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2023-24-3-116-120>. EDN: JJRYKW.
3. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool // Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1029. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012013>. EDN: DCAPIYD.
4. Blumenstein V.Y., Krechetov A. Regularities of technological inheritance in the categories of loading programs // Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1029. P. 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012012>. EDN: IAZVTV.
5. Андрюшкин А.Ю., Рустамова М.У., Кадочникова Е.Н. Влияние остаточных напряжений на прочность корпусов нефтегазового оборудования // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1. С. 6–14. EDN: KTCKNA.
6. Лаптева Е.Н. Применение нейронных сетей для оценки технологической наследственности деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 9. С. 39–44. <https://doi.org/10.14489/hb.2022.09.pp.039-044>. EDN: EVNASM.
7. Евдокимов Д.В., Алексенцев А.А., Букатый А.С., Ахтамьянов Р.М., Бычков Д.А. Разработка методики по оценке напряжённо-деформированного состояния изделий с учётом технологической наследственности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 3. С. 57–63. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-57-63>. EDN: KUXEKK.
8. Брылев А.В., Лизунов И.В., Николусь А.А., Исаев Ю.Ю. Влияние технологической наследственности на точность получения размеров при механической обработке деталей машин // Главный механик. 2022. № 1. С. 58–70. <https://doi.org/10.33920/pro-2-2201-06>. EDN: VGCUXY.
9. Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в наукоёмких технологиях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 3. С. 12–18. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-12-18>. EDN: BAFRTN.
10. Fedorov S.K., Yakovleva A.P., Perepelkin Yu.K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs // Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 182–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.182>. EDN: VWIOQF.
11. Третьяков А.Ф. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из металлических пористых материалов на основе технологической наследственности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 4. С. 185–193. <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2022-354-4-185-193>. EDN: COOXUH.
12. Тоиржонов О.З., Малышев Е.Н. Технологическая наследственность // Механика XXI века. 2022. № 21. С. 162–166. EDN: XLZMPS.
13. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration // Solid State Phenomena. 2022. T. 328 SSP. P. 27–37. <https://doi.org/10.4028/p-z92o0e>. EDN: EHXLXX.
14. Бутенко В.И., Шведова А.С. Влияние технологической наследственности на эксплуатационные показатели поверхностного слоя деталей после отделочно-упрочняющей обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 6. С. 254–260. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-6-254-260>. EDN: XDIIUC.
15. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure-iron during hardening treatment with a multiradius roller // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 328 SSP. P. 17–25. <https://doi.org/10.4028/p-2niz79>. EDN: UIIHJV.
16. Yakovleva A., Dubov A., Sobranin A., Karpovich E., Marchenkov A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing // Hydraulics. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. № 779. P. 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012019>. EDN: QPMNOW.
17. Fedorov S., Zaripov V., Ivanova Yu., Yakovleva A. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 963. Iss. 1. P. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012008>. EDN: FMGGVH.

18. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Investigation of effect of the state of the deformation zones on the structure of pure-iron samples after surface plastic deformation by a multiradius roller // *Technical Physics Letters*. 2024. Vol. 50. No. 1. P. 19–24. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700214>. EDN: ICJPSP.
19. Шеховцева Е.В. Концепция технологического обеспечения эксплуатационных свойств на основе стабилизации механических свойств материалов зубчатых колёс системы приводов газотурбинного двигателя // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2024. Т. 27. № 2. С. 15–24. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-2-15-24>. EDN: XZCPRL.
20. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // *Научные технологии в машиностроении*. 2023. № 8. С. 35–42. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-35-42>. EDN: WKULPH.

References

1. Krechetov A.A., Blyumenstein V.Yu., Zakonnova L.I. Analysis of inheritance mechanisms in animate nature and engineering. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2020;11:16-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-16-29>. EDN: NQTYXQ.
2. Medelyaev I.A. Technical mutational inheritance in machine part lubrication. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2023;3:116-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2023-24-3-116-120>. EDN: JJRYKW.
3. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool. In: *Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1029:012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012013>. EDN: DCAPYD.
4. Blumenstein V.Y., Krechetov A. Regularities of technological inheritance in the categories of loading programs. In: *Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1029:012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012012>. EDN: IAZVTV.
5. Andryushkin A.Yu., Rustamova M.U., Kadochnikova E.N. Effect of residual stresses on the strength of oil and gas equipment housings. *Problems of risk Management in the Technosphere*. 2022;1:6-14. (In Russ.). EDN: KTCKNA.
6. Lapteva E.N. The application of neural networks to evaluate the technological heredity of machine parts. *Handbook. Engineering Journal*. 2022;9:39-44. <https://doi.org/10.14489/hb.2022.09.pp.039-044>. EDN: EVNASM.
7. Evdokimov D.V., Aleksencev A.A., Bukaty A.S., Ahtamjanov R.M., Bychkov D.A. Development of the method on the stress-strain state assessment of products taking into account technological heredity. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;25(3):57-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-57-63>. EDN: KUXEKK.
8. Brylev A.V., Lizunov I.V., Nikolus A.A., Isaev Yu.Yu. Effect of technical inheritance on dimensioning accuracy under part machining. *Chief Mechanical Engineer*. 2022;1:58-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.33920/pro-2-2201-06>. EDN: VGCUXY.
9. Albagachiev A., Yakovleva A.P. Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;3:12-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-12-18>. EDN: BAFRTN.
10. Fedorov S.K., Yakovleva A.P., Perepelkin Yu.K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs. *Materials Science Forum*. 2020;989:182-186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.182>. EDN: VWIOQF.
11. Tretyakov A.F. Designing technological manufacturing processes of products from porous metallic materials based on technical inheritance. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2022;4:185-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2022-354-4-185-193>. EDN: COOXUH.
12. Toirzhonov O.Z., Malyshev E.N. Technical inheritance. *Mechanical engineers of the XXI century*. 2022;21:162-166. (In Russ.). EDN: XLZMPS.
13. Makhalov M.S., Blumenstein V.Y. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. *Solid State Phenomena*. 2022;328 SSP:27-37. <https://doi.org/10.4028/p-z92o0e>. EDN: EHXLXX.
14. Butenko V.I., Shvedova A.S. Effect of technological heredity on performance indicators of parts surface layer after finishing and strengthening treatment. *Strengthening Technologies and coatings*. 2023;19(6):254-260. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-6-254-260>. EDN: XDIUUC.
15. Blumenstein V.Y., Mitrofanova K.S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure-iron during hardening treatment with a multiradius roller. *Solid State Phenomena*. 2022;328 SSP:17-25. <https://doi.org/10.4028/p-2niz79>. EDN: UIIHJV.
16. Yakovleva A., Dubov A., Sobranin A., Karpovich E., Marchenkov A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing. In: *Hydraulics. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;779:012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012029>. EDN: QPMNOW.

17. Fedorov S., Zaripov V., Ivanova Yu., Yakovleva A. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;963(1):012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012008>. EDN: FMGGVH.
18. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Investigation of effect of the state of the deformation zones on the structure of pure-iron samples after surface plastic deformation by a multiradius roller. *Technical Physics Letters*. 2024;50(1):19-24. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700214>. EDN: ICJPSP.
19. Shekhovtseva E.V. The concept of technological support of operational properties based on stabilization of mechanical properties of gear materials in a gas turbine engine drive system. *Vestnik IZHGTU imeni M.T. KALASHNIKOVA* 2024;27(2):15-24. (In Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-15-24. EDN: XZCPRL.
20. Bezyazychnyi V.F., Шеховцева Е.В. Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;8:35-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-35-42>. EDN: WKULPH.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безъязычный Вячеслав Феоктистович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры инновационного
машиностроения,
Рыбинская государственная авиационная
технологическая академия имени П.А. Соловьева,
152903, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, Россия
technology@rsatu.ru

Шеховцева Евгения Владимировна,
к.т.н.,
начальник отдела,
Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»,
152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, 163, Россия
✉ janevsh@mail.ru
evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Шеховцева Татьяна Владимировна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры прикладной механики,
Рыбинский государственный авиационный
технический университет,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, Россия
prikl_mehanika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav F. Bezyazychnyi,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Innovative Engineering,
P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical
University,
53, Pushkin St., Rybinsk 152934, Russia
technology@rsatu.ru

Evgenia V. Shekhovtseva,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department,
Public Joint Stock Company «UEC-Saturn»,
163, Lenin pr., Rybinsk 152934, Russia
✉ janevsh@mail.ru
evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Tatiana V. Shekhovtseva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied
Mechanics,
P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical
University,
53, Pushkin St., Rybinsk 152934, Russia
prikl_mehanika@mail.ru

Заявленный вклад авторов

В.Ф. Безъязычный – идея, написание статьи, научное редактирование текста. Е.В. Шеховцева – идея, сбор и анализ сведений, написание статьи. Т.В. Шеховцева – обработка информации, написание статьи.

Authors' contribution

Vyacheslav F. Bezyazychnyi – idea, writing the article, scientific editing of the text of the article. Evgenia V. Shekhovtseva – idea, information collection and analysis, writing of the article. Tatiana V. Shekhovtseva – information processing, writing of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.04.2025 г.; принята к публикации 28.05.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 02.04.2025; accepted for publication 28.05.2025.