

УДК 621.828.93:621.833:621.83.061
DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-15-24

Концепция технологического обеспечения эксплуатационных свойств на основе стабилизации механических свойств материалов зубчатых колес системы приводов газотурбинного двигателя

Е. В. Шеховцева, кандидат технических наук, Публичное акционерное общество «ОКД-Сатурн», Рыбинск, Россия

Современное производство зубчатых передач для газотурбинных двигателей авиационного, морского и наземного назначения неотъемлемо связано с расчетом напряженного состояния рабочих поверхностей сопрягаемых зубьев. Для создания условий работоспособности зубчатой передачи и системы приводов в целом инженерный анализ контактной выносливости сопрягаемых поверхностей является необходимым критерием. Контактная прочность определяет ресурс зубчатого механизма. Величина контактной прочности с учетом ее распределения в зоне контакта рабочих сопрягаемых поверхностей зубчатых колес определяется технологией обработки и эксплуатацией, но наибольшее влияние оказывают механические свойства и текстура материала. Это обуславливает требования по стабильности механических свойств материалов, применяемых для изготовления зубчатых колес, делая актуальным вопрос по их изучению. Технология изготовления зубчатых колес приводов газотурбинного двигателя формирует послойное строение зубчатого венца на основании применения химико-термической обработки. Поверхностный упрочненный слой зубчатого венца шестерни после химико-термической обработки насыщается углеродом и азотом, а также в результате термического воздействия приобретает механические свойства и строение, отличные от материала в состоянии поставки.

В работе представлены результаты практических исследований эволюции механических свойств конструкционных сталей 20Х3МВФ-Ш, 18Х2Н4МА, 16ХЗНВФМБ-Ш и 12Х2Н4А-Ш исходя из различных видов химико-термической обработки, а также микроструктуры упрочненного слоя и сердцевины детали. Выполнена оценка стабилизации механических свойств сталей в процессе технологии производства зубчатых колес. Представленные результаты экспериментальных исследований механических свойств материала доказывают стабилизацию механических и структурных показателей, которые отвечают за контактную прочность сопрягаемых поверхностей зубчатых колес.

Ключевые слова: зубчатое колесо, механические свойства материала, технологическая наследственность.

Введение

Зубчатым передачам газотурбинных двигателей (ГТД) свойственно большое разнообразие видов и форм, типоразмеров и процессов эксплуатации. Элементы зубчатых механизмов работают при совокупности циклической и динамической нагрузок, тепла в масловоздушной среде [1–4].

Это определяет эксплуатационную потребность показателей деталей зубчатой передачи ГТД и обуславливает широкое применение конструкционных материалов, которым характерны высокие прочностные свойства [5–8]. Условия эксплуатации зубчатой передачи в составе приводов и редукторов ГТД формируют потребность в механических свойствах сталей исходя из сил в зацеплении, теплового поля и рабочей / окружающей сред [9–12]. По пределу прочности на разрыв (σ_B) стали конструкционные ориентировочно делятся на три категории прочности: нормальная (σ_B до 1000 МПа), повышенная (σ_B

от 1000 до 1500 МПа) и высокопрочная (σ_B более 1500 МПа) [13–15].

Но эксплуатационные параметры зубчатой передачи определяются совокупностью механических свойств материала (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , E), где σ_B – предел прочности, $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, δ – относительное удлинение, E – модуль упругости согласно ГОСТ 21354–87, ОСТ 1 00021–78, ISO 6336-5:2003 и марочника сталей. Наиболее актуально это для зубчатых колес, работающих при высоких контактных напряжениях авиационного и морского назначения. Данный фактор важен как при разработке зубчатой передачи, так и при ее изготовлении. Практически установлена нестабильность физико-механических свойств материалов (более 40%), а стабильность этих свойств важна для обеспечения работоспособности изделий. Опытно-производственная деятельность наглядно демонстрирует существенное влияние физико-механических свойств материала и его качества, процесса об-

работки материала и режимов работы [16, 17]. Это требует более точного определения характеристик деталей, которые зависят от свойств материала, начиная с момента их создания, и приводит к возросшему интересу к проблеме производства зубчатых колес для газотурбинных двигателей при повторяющихся нагрузках с учетом свойств материала и их стабильности [18].

Характеристики материала детали определяются методами производства [19]. Контактная поверхность содержит рабочий внешний слой, который получен путем механической обработки, шлифовки и обработки химико-термическими методами. Качество рабочего внешнего слоя определяет рабочие условия сопрягаемых поверхностей. В результате исследований целесообразно при разработке и производстве зубчатой передачи особое внимание уделить технологической наследственности изготовления.

Существующий опыт ученых в сфере обеспечения эксплуатационных характеристик и проблематики стабильности свойств материалов определяют актуальность вопроса нестабильности механических свойств материалов [20–22] и их важность для обеспечения технических характеристик изделия.

Цель исследования – разработка концепции обеспечения эксплуатационных показателей зубчатых колес в процессе изготовления исходя из механических свойств материала, опираясь на серийные технологии изготовления с учетом упрочненного слоя.

Методы и материалы

Зубчатый венец шестерни ГТД представляет собой совокупность рабочей поверхности с упрочненным слоем, который образуется при механической и химико-термической обработках, и сердцевины, формирующейся в процессе обработки давлением и термической обработки. Следовательно, работоспособность зубчатых колес определяется технологической наследственностью при производстве детали в целом, потому что эксплуатационные характеристики зависят от качества рабочих поверхностей и физико-механических свойств материала и их сочетания.

При проектировании зубчатого зацепления и рабочего чертежа шестерни конструктор назначает конфигурацию зубчатой передачи, материал, химико-термическую обработку (ХТО), степень точности и качество обработки. Технолог при разработке технологического процесса задает способы обработки, гарантирующие необходимые качество и точность объекта производства.

Свойства сердцевины материала зубчатых колес складываются, во-первых, при обработке давлением, во-вторых, термической обработки, а на свойства рабочих поверхностей влияет вся технология изготовления. Таким образом, формируется технологическая наследственность каждого слоя детали, которая влияет на эксплуатационные характеристики с учетом технологического, конструкторского и прочностного аспектов.

Следовательно, является актуальным изучение наследования физико-механических свойств материалов зубчатых колес в процессе их производства, начиная с проектирования и заканчивая сопровождением в эксплуатации исходя из возможностей технологического процесса.

Технологический процесс изготовления зубчатого венца включает в себя следующие виды механической обработки: зубофрезерные и зубошлифовые, которые исследуются в условиях роликовой аналогии. Механические свойства сердцевины материала после химико-термической обработки изучаются на отдельных образцах с применением соответствующего способа защиты от насыщения – меднение или экранирование.

Эволюция наследования свойств материалов и технических характеристик рабочих поверхностей зубчатых колес

Предмет изучения – это образцы для исследования свойств материала упрочненного слоя с сердцевиной при растяжении (рис. 1, *a*) и рабочих характеристик (рис. 1, *b*). Образцы изготавливаются из сталей 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н4МА, 12Х2Н4А-Ш и 16ХЗНВФМБ-Ш в связи с назначением для производства зубчатых механизмов исходя из условий упрочнения рабочих поверхностей (табл. 1).

Исследования технологической наследственности механических свойств выполнялось на образцах материала в состоянии поставки, после термической и механической обработки, а также после химико-термического упрочнения на основе серийных процессов; исключение составляет применение азотирования для стали 12Х2Н4А-Ш.

Выполнены исследования по изменению механических свойств материала: предел текучести, предел прочности и модуль упругости. В процессе изучения образцы прошли испытания на растяжение (рис. 2, *a*) на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H100KU согласно ГОСТ 1497–84. Предварительно образцы прошли ЛЮМ-контроль (рис. 2, *b*).

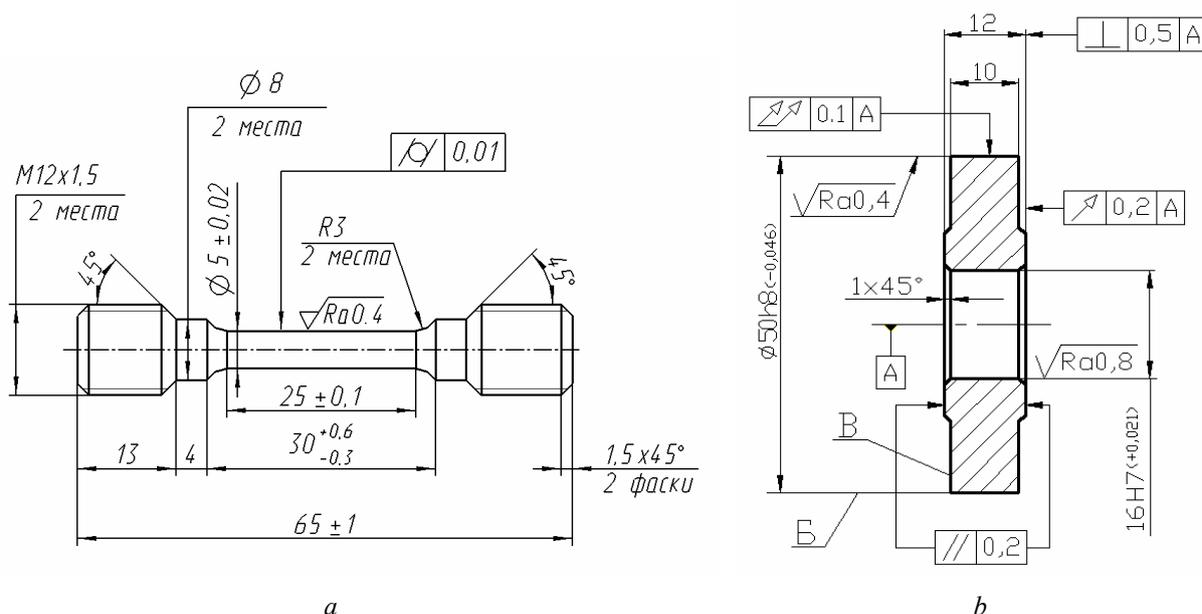


Рис. 1. Эскизы опытных образцов: а – для растяжения; б – для обкатки

Fig. 1. Prototypes sketches: a - for stretching; b - for running-in

Таблица 1. Условия химико-термической обработки исследуемой зоны

Table 1. Conditions of chemical-thermal treatment of the investigated zone

Нитроцементация	$h = 0,6 \dots 1,2$ мм; твердость ≥ 59 HRC, 33...45 HRC сердцевины
Азотирование ионное	$h = 0,2 \dots 0,4$ мм; твердость ≥ 650 HV, 321...388 HB сердцевины



a



b

Рис. 2. Образцы: а – после испытания; б – в процессе ЛЮМ-контроля

Fig. 2. Samples: a - after the test; b - during FPI

На рисунках 3–5 показан процесс становления механических свойств материалов в рамках наследования свойств. На графиках применены следующие обозначения: ТО – термическая обработка, НЦ – нитроцементация, А – ионное азотирование, У – упрочненный слой, С – сердцевина.

Оценка экспериментальных исследований физико-механических свойств сталей наглядно демонстрирует, что при обработке давлением про-

исходит увеличение пределов прочности и текучести при незначительном уменьшении по модулю упругости. Универсальные способы механической обработки (токарная, фрезерная, шлифовальная) формирования геометрии поверхности не оказывают существенного влияния на свойства материалов. Значительное влияние в становлении свойств материала деталей оказывают операции с температурной обработкой материала – термическая и химико-термическая.

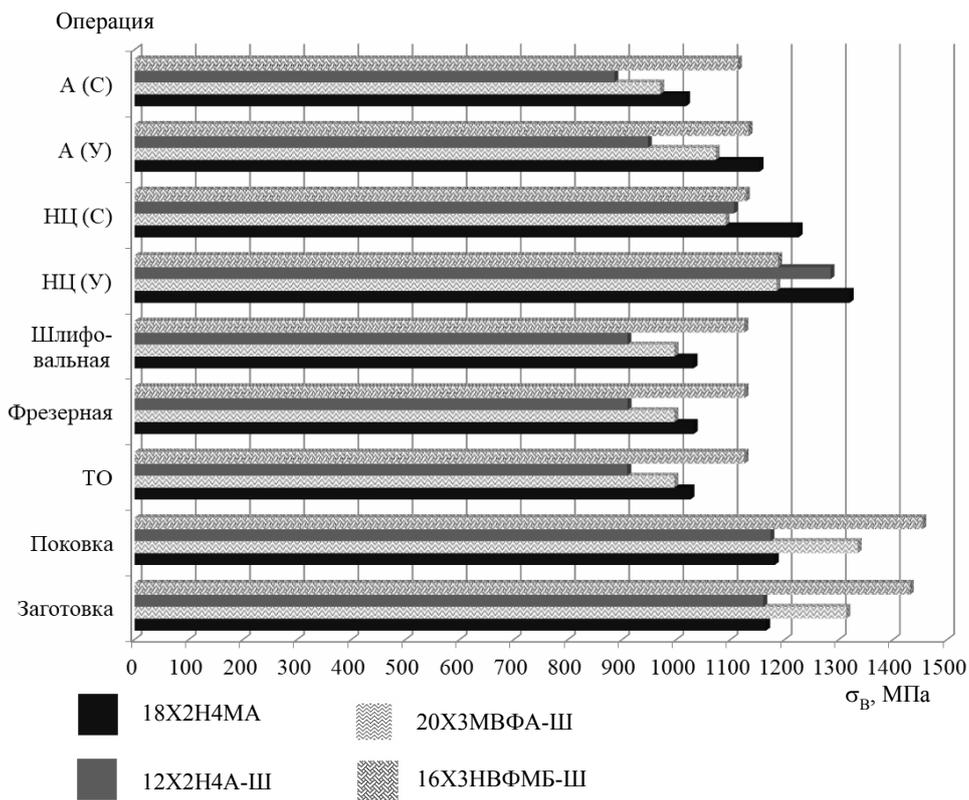


Рис. 3. Технологическая наследственность предела прочности

Fig. 3. Technological heritability of ultimate strength

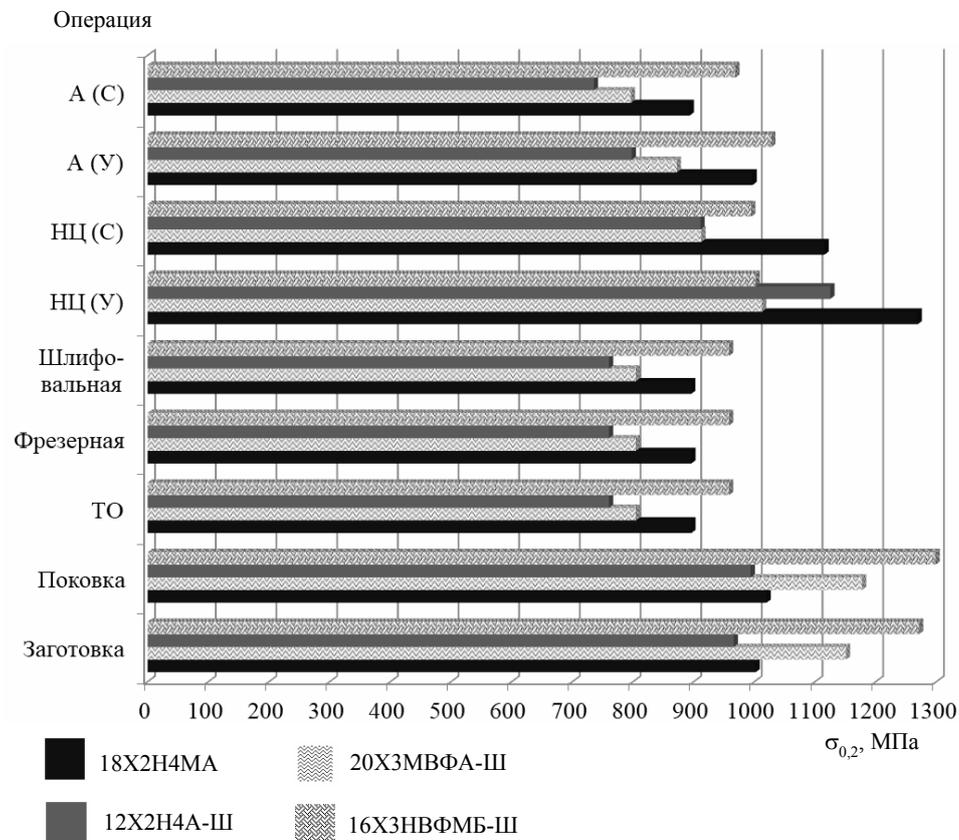


Рис. 4. Технологическая наследственность предела текучести

Fig. 4. Technological heritability of yield strength

Анализ механических свойств по их нестабильности, представленный на рисунке 6, иллюстрирует стабилизацию свойств сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФА-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А-Ш после пластической деформации заготовки, температурного воздействия в совокупности с последующим химическим поверхностным насыщением углеродом и азотом. Величина колебания свойств материала в процессе технологического наследования детали относительно материала полуфабриката сокращается; стабилизирование предела прочности – более 12 %, предела текучести – не менее 17,5 %. На рисунке 6 аббревиатурой МО обозначена механическая обработка.

Рабочие поверхности зубьев зубчатых колес должны сопротивляться циклическому нагружению, что делает значимым параметр «модуль упругости».

Сопоставление модуля упругости на основе опытных данных и справочной информации приведено в таблице 2 и на рисунке 7.

Сравнение эмпирических и справочных данных по модулю упругости после нитроцементации и ионного азотирования иллюстрирует разницу величины по рабочей поверхности в диапазонах 2,5...14,5 % и 8,7...18,4 % применительно

к сердцевине. Эта информация актуальна при проведении инженерного контактного анализа и подтверждает важность разработки методики расчета контактной выносливости исходя из технологии изготовления и наследования механических свойств материала [23].

Изучена эволюция структуры материала в процессе изготовления: полуфабрикат (рис. 8, а), после термообработки (рис. 8, б), фрезерования (рис. 8, с), ХТО – нитроцементации (рис. 8, d, e), ионного азотирования (рис. 8, f, g) и шлифования.

Сортовой прокат из стали 18Х2Н4МА имеет аустенитное зеренное строение при равномерном распределении без посторонних включений. Мелкозернистая текстура соответствует баллам 6–8 зерна по шкале 1 по ГОСТ 5639. Также в сортовом прокате выявлены единичные несплошности (рис. 8, h) размером максимум до 9 нм, допустимые согласно ГОСТ 5639, при хаотичном их распределении. После термообработки строение структуры мелкозернистое соответствует баллу 7 зерна по шкале 1 по ГОСТ 5639 при исключении несплошностей или при их смещении в область напуска. После фрезерной обработки изменений в строении материала не наблюдается.

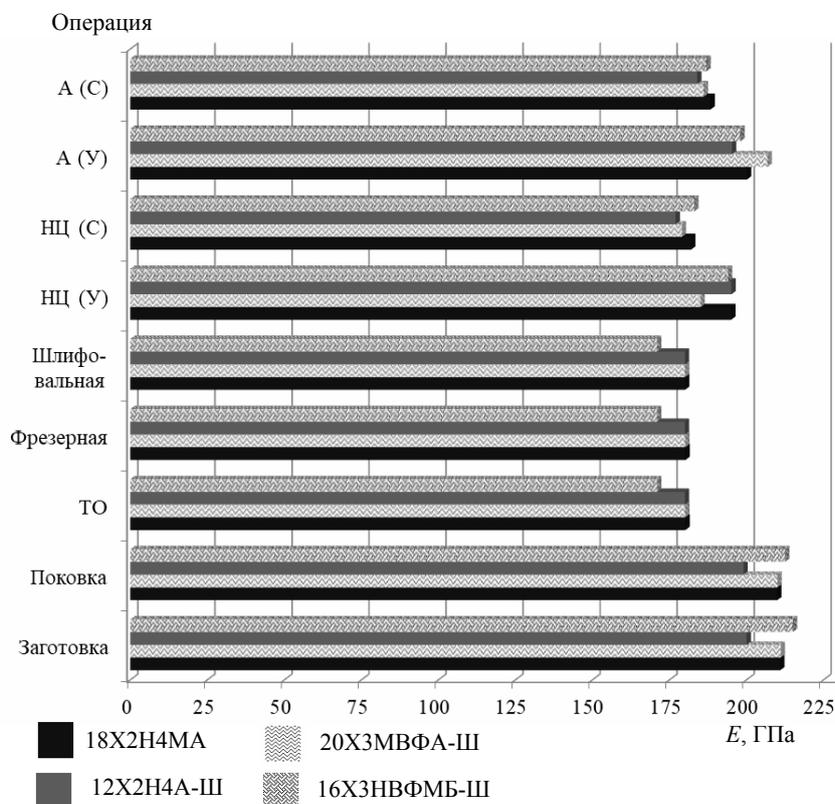


Рис. 5. Технологическая наследственность по модулю упругости

Fig. 5. Technological heredity by modulus of elasticity

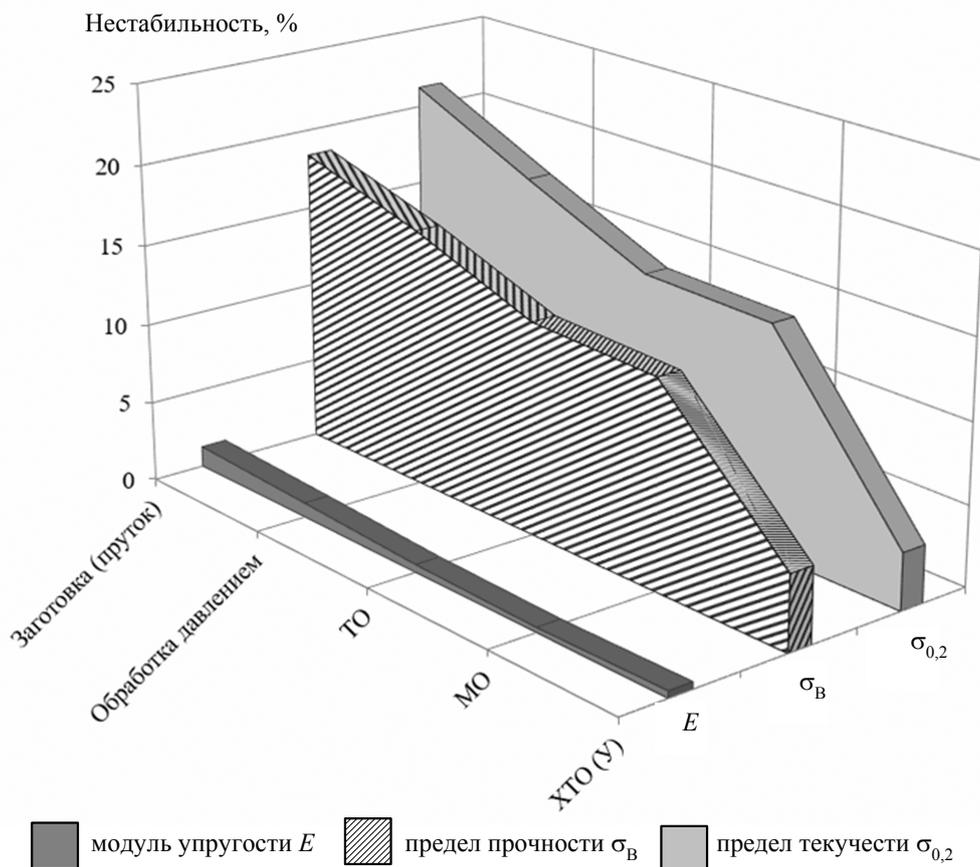


Рис. 6. Технологическое устранение нестабильности механических свойств сопрягаемых поверхностей зубьев
 Fig. 6. Technological elimination of instability of mechanical properties of mating surfaces of teeth

Таблица 2. Сопоставление эмпирических и справочных величин по E

Table 2. Comparison of empirical and reference values for E

Материал	ХТО	Модуль упругости E , ГПа			Расхождение между справочными и экспериментальными значениями, %	
		Упрочненный слой	Сердцевина	Справочное	Упрочненный слой	Сердцевина
18X2H4MA	НЦ	195,01	182	211	8,2	15,93
	А	200,09	188,3		5,45	12,06
20X3МВФА-Ш	НЦ	185,1	179	212	14,53	18,44
	А	206,8	186,09		2,51	13,92
12X2H4A(-Ш)	НЦ	195,09	176,97	200	2,51	13,01
	А	195,28	184		2,42	8,7
16X3НВФМБ-Ш	НЦ	194	183,01	215	10,82	17,48
	А	198	187,02		8,59	14,96

Микроструктура после нитроцементирования по насыщенности карбидной сетки соответствует баллу 4, а по распределению структурных составляющих – баллу 1. Микроструктура сердцевины соответствует баллу 4 (ГОСТ 5639) согласно эталону и состоит из мелкоигольчатого мартенсита и свободного феррита.

Азотированный слой имеет мелкозернистую структуру с отсутствием на поверхности нитридной сетки и плавным переходом к сердцевине

не материала, которая согласно ГОСТ 5639 соотносится с баллом 4.

После шлифования структура материала не меняется и соответствует представленным на рисунке 8, e , h соответственно ХТО.

Таким образом, структурная стабилизация материала наблюдается после термического воздействия, в том числе с насыщением углеродом и азотом поверхностного слоя.

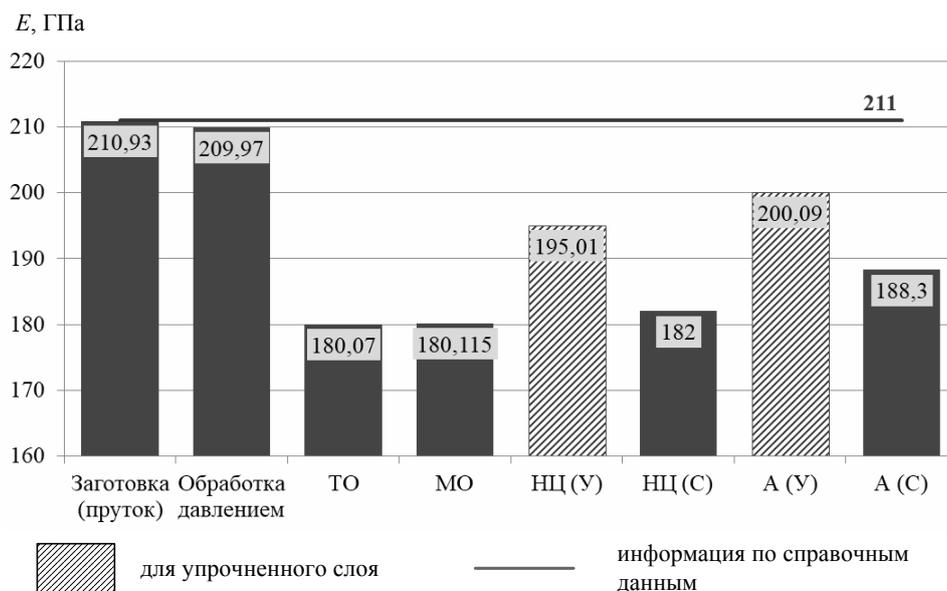


Рис. 7. Эволюция величины модуля упругости для стали 18X2N4MA

Fig. 7. Evolution of elastic modulus for steel 18X2N4MA

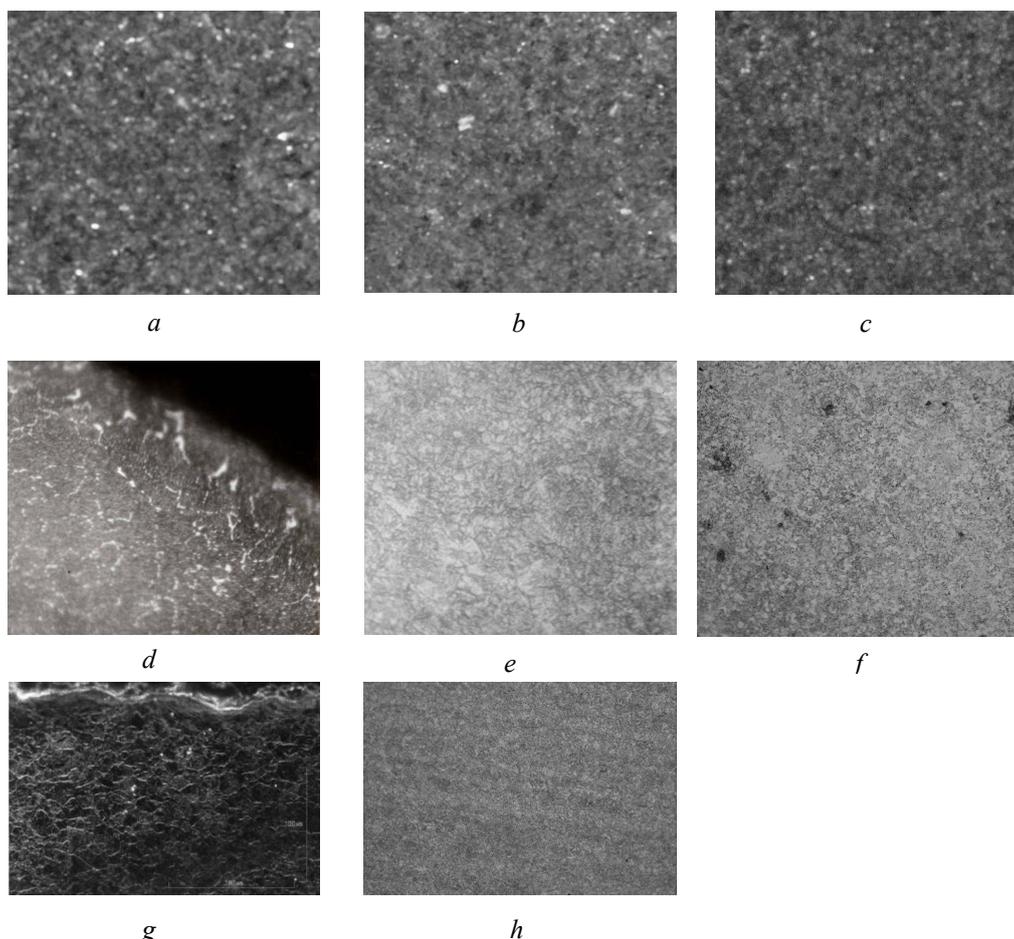


Рис. 8. Эволюция структуры 18X2N4MA при изготовлении: *a* – сортовой прокат, $\times 250$; *b* – после термической обработки, $\times 250$; *c* – после механической обработки, $\times 250$; *d* – нитроцементированный слой, $\times 500$; *e* – сердцевина после нитроцементации, $\times 500$; *f* – азотированный слой, $\times 500$; *g* – сердцевина после ионного азотирования, $\times 200$; *h* – несплошности, $\times 50$

Fig. 8. The evolution of the 18X2N4MA structure in the manufacture of: *a* - long products, $\times 250$; *b* - after heat treatment, $\times 250$; *c* - after mechanical treatment, $\times 250$; *d* - nitro-cemented layer, $\times 500$; *e* - core after nitro-cementation, $\times 500$; *f* - nitrided layer, $\times 500$; *g* - core after ion nitriding, $\times 200$; *h* - discontinuities, $\times 50$

Выводы

Эмпирически установлена стабилизация физико-механических свойств материала готовой шестерни, которая составляет для диффузионного поверхностного слоя по пределу текучести более 17 %, по пределу прочности более 13 %; для сердцевины детали – 15 и 12 % соответственно. Также доказано, что наиболее существенное влияние для благоприятного формирования структуры и свойств материала оказывает термическое воздействие и обработка давлением.

Подтверждено опытным путем, что модуль упругости готовой шестерни в значительной мере отличается от информации, указанной в справочниках. Исследования показали, что для сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФА-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А-Ш в зависимости от процесса поверхностного насыщения углеродом и азотом фактическое значение модуля Юнга варьируются в диапазоне 2,5...14,5 % по упрочненной поверхности и 8,7...18,4 % по сердцевине относительно справочной информации.

Библиографические ссылки

1. Соппротивление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. А. Шишко, П. Г. Карпович // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019. № 1 (46). С. 58–63.
2. Повышение ресурса работы зубчатой передачи на основе выбора технологии упрочнения рабочих поверхностей зубьев / Л. И. Куксенова, С. А. Поляков, М. С. Алексеева, С. В. Рубцов // *Вестник научно-технического развития*. 2019. № 3 (139). С. 24–36.
3. *Короткин В. И., Колосова Е. М.* Высокотвердые модифицированные зубчатые передачи Новикова для приводных редукторов специального назначения // *Вестник машиностроения*. 2023. № 4. С. 318–322.
4. *Клепиков В. В.* Технология обработки зубчатых колес : монография. М. : ИНФРА-М, 2024. 409 с.
5. *Короткин В. И., Колосова Е. М., Онишков Н. П.* Прогнозирование контактной выносливости упрочненных зубьев и нагрузочной способности эвольвентных зубчатых передач по критерию предельного состояния материала // *Вестник машиностроения*. 2021. № 12. С. 35–37.
6. *Овсеев А. Н., Клауч Д. Н., Носов Д. П.* Качество поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при механической обработке // *Тяжелое машиностроение*. 2019. № 4. С. 19–23.
7. *Киричек А. В., Титенок А. В., Титенок И. А.* Повышение коэффициента полезного действия зубчатого зацепления // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 3 (76). С. 43–50.
8. *Короткин В. И., Колосова Е. М., Онишков Н. П.* Оценка нагрузочной способности химикотермически упрочненных зубчатых передач с локальным контактом зубьев // *Вестник машиностроения*. 2020. № 8. С. 34–37.
9. *Руденко С. П., Валько А. Л., Сандомирский С. Г.* Применение перспективных экономно-легированных марок сталей для зубчатых колес мобильных машин // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019. № 4 (49). С. 61–69.
10. *Шеховцева Т. В., Шеховцева Е. В.* Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 6. С. 406–416.
11. *Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Федонина С. О.* Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно термически упрочненных сталей // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2019. № 8 (98). С. 25–28.
12. *Моргаленко Т. А.* Технология обработки поверхностей трения скольжения, основанная на применении твердых износостойких покрытий, с учетом влияния технологической наследственности // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 12 (114). С. 31–38.
13. *Мыльников В. В., Шетулов Д. И., Мясников А. М.* Влияние режимов термической обработки мартенситностареющей стали на усталостные характеристики и параметры микродеформации // *Современные наукоемкие технологии*. 2021. № 6-1 С. 74–78.
14. *Крукович М. Г., Федотова А. Д.* Инженерия поверхностей деталей машин для повышения износостойкости // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2021. № 34. С. 52–58.
15. *Шарая О. А., Пастухов А. Г., Кравченко И. Н.* Инженерия поверхности упрочненных деталей : монография. М. : ИНФРА-М, 2020. 124 с.
16. Анализ взаимосвязей некоторых параметров поверхностей зубьев цилиндрических шестерен с режимами зубофрезерования / М. М. Кане, В. К. Шеллег, М. А. Кравчук, П. И. Кот // *Актуальные вопросы машиностроения*. 2019. № 9. С. 251–255.
17. *Ворожцова Н. А., Горбунов А. С., Макаров В. Ф.* Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2019. № 2. С. 22–28.
18. *Безъязычный В. Ф., Шеховцева Е. В.* Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2023. № 8 (146). С. 35–42.
19. *Шеховцева Е. В., Шеховцева Т. В.* Взаимосвязь физико-механических свойств материала, технологических условий обработки и эксплуатационных характеристик зубчатых колес // *Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева*. 2023. № 1 (64). С. 61–65.
20. *Сосновский Л. А.* О выборе современного конструкционного металлического материала для механических систем ответственного назначения. Часть 1 // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2022. № 3 (60). С. 85–96.

21. Сосновский Л. А. О выборе современного конструкционного металлического материала для механических систем ответственного назначения. Часть 2 // Механика машин, механизмов и материалов. 2022. № 4 (61). С. 86–96.

22. Руденко С. П., Валько А. Л., Сандомирский С. Г. Анализ применимости стали 20MnCrS5 для зубчатых колес отечественных мобильных машин // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 44–49.

23. Шеховцева Т. В., Шеховцева Е. В. Методология обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе знаний механических свойств материала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 31–34.

References

1. Rudenko S.P., Valko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G. (2019) [Resistance to contact fatigue of coarse-grained gears of chromium-nickel steels]. *Mechanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2019, no. 1, pp. 58–63 (in Russ.).

2. Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V. (2019) [Increasing the service life of gears based on the choice of hardening technology working surfaces of the teeth]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, 2019, no. 3, pp. 24–36 (in Russ.).

3. Korotkin V.I., Kolosova E.M. (2023) [Highly rigid modified Novikov gears for special purpose drive gearboxes]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2023, no. 4, pp. 318–322 (in Russ.).

4. Klepikov V.V. (2024) *Tehnologija obrabotki zubchatykh koles* [Technology of gear processing]. Moscow: INFRA-M Publ., 2024, 409 p. (in Russ.).

5. Korotkin V.I., Kolosova E.M., Onishkov N.P. (2021) [Forecasting the contact endurance of hardened teeth and the load capacity of involute gears according to the criterion of the limiting state of the material]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 12, pp. 35–37 (in Russ.).

6. Ovseenko A.N., Klauch D.N., Nosov D.P. (2019) [The quality of the surface layer of cylindrical gears during mechanical processing]. *Tjazeloe mashinostroenie*, 2019, no. 4, pp. 19–23 (in Russ.).

7. Kirichek A.V., Titenok A.V., Titenok I.A. [Increasing the efficiency of gearing]. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 43–50 (in Russ.).

8. Korotkin V.I., Kolosova E.M., Onishkov N.P. (2020) [Assessment of the load capacity of chemically-hardened gears with local tooth contact]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 8, pp. 34–37 (in Russ.).

9. Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. (2019) [Application of promising sparingly alloyed steels for gears of mobile machines]. *Mechanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2019, no. 1, pp. 61–69 (in Russ.).

10. Shehovtseva E.V., Shehovtseva T.V. (2019) [The features of working surfaces damages of gears in a gas turbine engine]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2019, No. 6, pp. 406–416 (in Russ.).

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Fedonina S.O. (2019) [Manifestation of technological heredity in the study of hardness of deformation-thermally hardened steels]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2019, no. 8, pp. 25–28 (in Russ.).

12. Morgalenko T.A. (2020) [Processing technology of sliding friction surfaces based on the use of hard wear-resistant coatings, taking into account the influence of technological heredity]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2020, no. 12, pp. 31–38 (in Russ.).

13. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Myasnikov A.M. (2021) [Influence of heat treatment modes of sparingly alloyed steels on fatigue characteristics and microdeformation parameters]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, 2021, no. 6-1, pp. 74–78 (in Russ.).

14. Krukovich M.G., Fedotova A.D. (2021) [Surface engineering of machine parts to improve wear resistance]. *Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii*, 2021, no. 34, pp. 52–58 (in Russ.).

15. Sharaya O.A., Pastukhov A.G., Kravchenko I.N. (2020) *Inzhenerija poverhnosti uprochnennykh detalej* [Surface engineering of hardened parts]. Moscow: INFRA-M Publ., 2020, 124 p. (in Russ.).

16. Kane M.M., Sheleg V.K., Kravchuk M.A., Kot P.I. (2019) [Analysis of interrelations of parameters of quality of teeth surfaces of spur gears with gear milling modes]. *Aktual'nye voprosy mashinostroeniya*, 2019, no. 9, pp. 251–255 (in Russ.).

17. Vorozhtsova N.A., Gorbunov A.S., Makarov V.F. (2019) [Ensuring the quality of the gear ring of cylindrical wheels during processing with a combined grinding and polishing worm wheel]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2019, no. 2, pp. 22–28 (in Russ.).

18. Bezyazychnyi V.F., Shehovtseva E.V. (2023) [Technological support of aircraft gas turbine engine gears manufacturing taking into account instability of physical and mechanical properties of their materials]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2023, no. 8, pp. 35–42 (in Russ.).

19. Shehovtseva E.V., Shehovtseva T.V. (2023) [Interrelation of physical and mechanical properties of the material, technological processing conditions and operational characteristics of gears]. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solov'eva*, 2023, no. 1, pp. 61–65 (in Russ.).

20. Sosnovsky L.A. (2022) [On the choice of modern structural metal material for mechanical systems of responsible purpose. Part 1]. *Mechanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2022, no. 3, pp. 85–96 (in Russ.).

21. Sosnovsky L.A. (2022) [On the choice of modern structural metal material for mechanical systems of responsible purpose. Part 2]. *Mechanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2022, no. 4, pp. 86–96 (in Russ.).

22. Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. (2020) [Analysis of the applicability of steel 20MnCrS5 for gears of the domestic mobile machines]. *Lit'e i metallurgiya*, 2020, no. 1, pp. 44–49 (in Russ.).

23. Shehovtseva T.V., Shehovtseva E.V. (2023) [Methodology support of gears operational properties on the basis of material mechanical properties knowledge]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2023, iss. 9, pp. 31–34 (in Russ.).

The Concept of Technological Support of Operational Properties Based on Stabilization of Mechanical Properties of Gear Materials in a Gas Turbine Engine Drive System

E.V. Shehovtseva, PhD in Engineering, Joint Stock Company “UEC-Saturn”, Rybinsk, Russia

Modern production of gears for gas turbine engines for aviation, marine and land use is inherently related to the calculation of the stress state of the working surfaces of the mating teeth. To create conditions for the operability of the gear train and the drive system as a whole, an engineering analysis of the contact endurance of the mating surfaces is a necessary criterion. The contact strength determines the life of the gear mechanism. The value of the contact strength, taking into account its distribution in the contact zone of the working mating surfaces of the gears, is determined by the processing technology and operation, but the mechanical properties and texture of the material have the greatest influence. This determines the requirements for the stability of the mechanical properties of the materials used for the manufacture of gears, making a topical question on their study. The technology of manufacturing the gears in the gas turbine engine drives forms the layer structure of the toothed crown because of the use of chemical-thermal treatment. The surface hardened layer of the gear tooth after chemical-thermal treatment is saturated with carbon and nitrogen, and as a result of thermal action acquires mechanical properties and structure different from the material in the supply.

The paper presents the results of practical research of evolution of mechanical properties of structural steels 20H3MVF-Sh, 18H2N4MA, 16H3NVFM-Sh and 12H2N4A-Sh based on various types of chemical-thermal treatment, as well as microstructure of toughened layer and core of the part. The steel mechanical properties stabilization evaluation in the process of gear technology was performed. The presented results of experimental studies of mechanical properties of the material prove stabilization of mechanical and structural indicators, which are responsible for the contact strength of the mating surfaces of toothed gears.

Keywords: gear, mechanical properties of the material, technological inheritance.

Получено 03.04.2024

Образец цитирования

Шеховцева Е. В. Концепция технологического обеспечения эксплуатационных свойств на основе стабилизации механических свойств материалов зубчатых колес системы приводов газотурбинного двигателя // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 15–24. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-15-24

For Citation

Shehovtseva E.V. (2024) [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, vol. 27, no. 2, pp. 15-24 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-15-24