

УДК 621.785.5:621.87:539.4

П.Н. Демидов, М.Ю. Семенов, М.Ю. Рыжова

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ВЫБОРА СПОСОБА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрен вопрос выбора современных способов химико-термической обработки для зубчатых колес, применяемых в зубчатых передачах тяжелой строительной и дорожной техники. Разработано прикладное программное средство, дающее возможность разработчику определять способ упрочнения зубчатых колес в зависимости от требуемого уровня сопротивления контактной усталости. Прикладное программное средство применено для разработки режима упрочнения тяжело нагруженных зубчатых передач.

Ключевые слова: зубчатые колеса, вакуумная цементация, ионное азотирование, контактная выносливость, математическое моделирование.

Зубчатые передачи современных дорожных и строительных машин работают в условиях высоких контактных и изгибных нагрузок, как статических, так и усталостных, зачастую при низких температурах. Особенности эксплуатации зубчатых колес указанных машин являются неустановившийся режим работы, реверсивность, вибрации и т.п. Наиболее распространенными причинами выхода из строя зубчатых передач данного вида техники являются питтинг и усталостный излом [1].

Возможно применение открытых передач, которые работают в условиях, способствующих абразивному изнашиванию. Вместе с тем для данной техники, как правило, не применяются высокоскоростные передачи, в связи с чем адгезионное изнашивание и заедание не являются характерной причиной выхода зубчатых передач этой категории из строя.

До настоящего времени на территории стран СНГ для зубчатых передач рассматриваемого вида машин широко применяются стали типа 18ХГТ и 25ХГТ [1]. Типовыми способами химико-термической обработки (ХТО) остаются газовые цементация и нитроцементация.

Однако данные технологии не обеспечивают необходимую воспроизводимость результатов обработки, допускают обезуглероживание и насыщение кислородом упрочняемой поверхности зубчатых колес, что неизбежно приводит к раннему выходу зубчатых колес из строя вследствие циклических контактных и изгибных нагрузок. В связи с этим такие изделия полностью утратили конкурентоспособность по сравнению с продукцией передовых иностранных производителей, даже бывшей в употреблении.

С учетом перехода в условиях новых экономических отношений с массового на серийное производство представляется целесообразным шире применять сложнолегированные цементуемые стали типа 20Х2Н4А, а также азотируемые стали типа 38Х2МЮА или не содержащие алюминий, характеризующиеся более высокими свойствами сердцевины стали типа 40ХН2МА. Одновременно устаревшие способы газовой ХТО целесообразно заменять на вакуумную цементацию и ионное азотирование.

Повышенное содержание никеля обосновано в случае использования дорожной и строительной техники в условиях низких температур, обуславливающих уменьшение вязкости стали и рост склонности к хрупкому разрушению зубчатых колес. Увеличение концентрации хрома, молибдена и других сильных карбидообразующих легирующих элементов приводит к образованию развитой карбидной фазы на поверхности, предотвращающей изнашивание поверхности по механизму микрорезания в кварцевом абразиве.

Преимуществом азотированных слоев хромомолибденоалюминиевых сталей является их высокая твердость (до $HV = 1200$ МПа) по сравнению с цементованными и нитроцементованными (в пределах $HV = 800$ МПа), что обуславливает их применение в содержа-

щих частицы абразива средах. При этом износостойкость поверхности азотированных хромоникелевых сталей (при твердости до $HV = 700$ МПа) приближается к триботехническим свойствам цементованных и нитроцементованных сталей [2].

Существенным недостатком азотированных слоев является их склонность к усталостному разрушению при изгибе. Механизм повышения прочности при азотировании, предполагающий упрочнение наноразмерными когерентными и/или полуккогерентными частицами нитридов, допускает многократное прохождение через них дислокаций. Это приводит к механическому перемешиванию атомов в пределах выделений и, как следствие, к их разупрочнению [3]. Очевидно, что разупрочнение частиц нитридов означает снижение прочности материала в целом.

Следует отметить, что основным критерием работоспособности тяжело-нагруженных зубчатых колес является сопротивление контактной усталости, поскольку приведенные контактные напряжения по модулю кратно превышают изгибные. Кроме того, максимальные касательные напряжения возникают на некотором расстоянии от поверхности, где прочностные свойства слоя понижаются [4; 5]. При этом вызванная контактными напряжениями зародышевая трещина в приповерхностной упрочненной зоне практически мгновенно достигает поверхности и вызывает питтинг, а зародившаяся на поверхности усталостная трещина приводит к разрушению зуба только после распространения на значительную глубину, включающую в себя частично вязкую сердцевину.

В связи с этим для обоснованного выбора способа ХТО (вакуумная цементация или ионное азотирование) разработали прикладное программное средство, сопоставляющее прочностные свойства диффузионного слоя, изменяющиеся по его глубине, с распределением приведенных контактных напряжений.

Первый расчетный модуль [5] основан на известном решении плоской контактной задачи [6]. Зацепление зубьев рассматривали как контакт цилиндров, нагруженных нормальной силой, приложенной к площадке контакта. В расчетную программу заложили соотношения, в соответствии с которыми по задаваемым факторам геометрии зубчатого колеса (число зубьев, модуль передачи, ширина зубчатого венца, угол зацепления) и приложенной контактной нагрузки рассчитывали ширину площадки контакта, максимальные контактные напряжения на площадке контакта, распределение по глубине приповерхностной зоны нормальных (σ_i) и касательных (τ_{ij}) напряжений, а также приведенного контактного напряжения по формуле

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Второй расчетный модуль [5] применяли для определения распределения предела контактной выносливости по глубине цементованного и азотированного слоев, которое в соответствии с действующим стандартом (ГОСТ 21354-87) оценивали в зависимости от твердости поверхности по эмпирической формуле

$$\sigma_{H \text{ lim}} = 23\text{HRC}. \quad (1)$$

Выражение (1) эквивалентно соотношению

$$\sigma_{H \text{ lim}} = 1,25\text{HV},$$

где $\sigma_{H \text{ lim}}$ и HV выражены в МПа.

Для определения твердости при вакуумной цементации пользовались связывающей насыщенность слоя и твердость формулой, отражающей аддитивный вклад в общую твердость мартенситной и карбидной фаз, образующихся в комплексно-легированных сталях при науглероживании [5]:

$$\text{HV} = p_{\text{ц}}\text{HV}_{\text{ц}} + p_{\text{к}}\text{HV}_{\text{к}} + (1 - (p_{\text{ц}} + p_{\text{к}}))\text{HV}_{\text{м}}(C_{\text{н}});$$

где $HV_{ц}$, $HV_{к}$ – соответственно твердость по Виккерсу цементита и специальных карбидов (карбонитридов); $HV_{м} = HV_{м}(C_{н})$ – твердость по Виккерсу мартенсита, являющаяся функцией от суммарной концентрации в нем насыщающих элементов $C_{н}$; $p_{ц}$, $p_{к}$ – объемные доли частиц цементита и специальных карбидов. Значения $C_{н}$, $p_{ц}$, $p_{к}$ находили путем решения диффузионной задачи насыщения углеродом по методике [7; 8].

Значения HV для различных режимов ионного азотирования получали путем регрессионного анализа экспериментальных данных, которые были получены для близких аналогов сталей 40XH2MA (AISI 4340, США) [9] и 38XM (709M40, Великобритания) [10].

Критерием контактной прочности является выполнение для всей глубины слоя неравенства

$$\sigma_{пр} K_i \leq \sigma_{H \text{ lim}}, \quad (2)$$

где K_i - коэффициент безопасности (от 1,0 до 1,5). Обычно применяется коэффициент безопасности, равный 1,25 (при особо тяжелых условиях работы передачи - 1,5).

Соотношения, входящие в первый и второй расчетный модули, формализовали в программном средстве на языке Object Pascal в интегрированной среде Delphi.

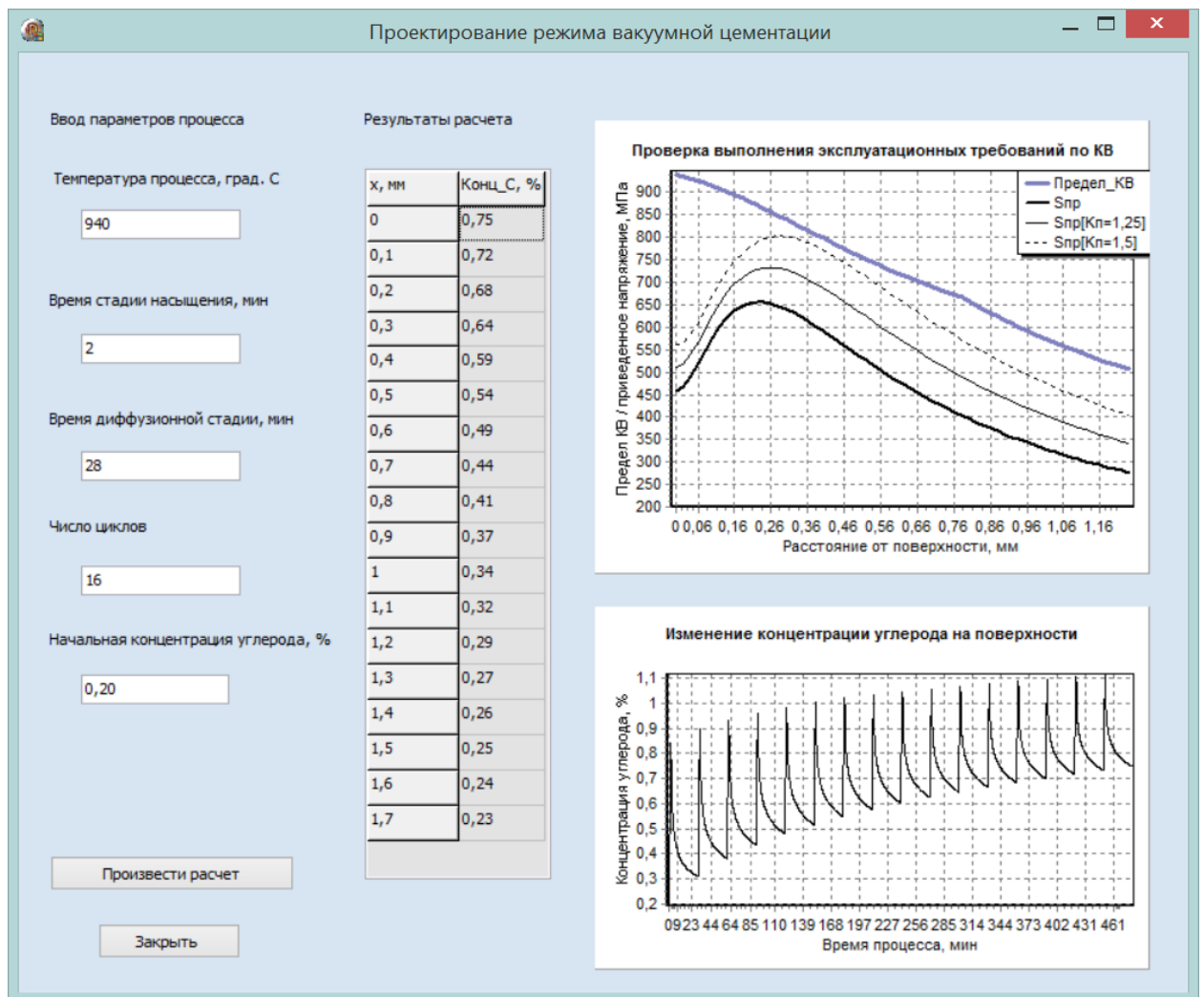


Рис. 1. Отображение на экране компьютера результатов расчета режима вакуумной цементации, удовлетворяющих эксплуатационным требованиям по контактной выносливости с коэффициентом безопасности не менее 1,5

При помощи программного средства рассчитали режимы вакуумной цементации для обработки цилиндрической прямозубой зубчатой передачи со следующими геометрическими параметрами: модуль - 4 мм, число зубьев - 24 и 36, ширина зубчатого венца - 50 мм, угол зацепления - 20° . Распределенная нормальная нагрузка равна 650 Н/мм.

Результаты расчета показали, что вакуумная цементация стали 20ХН3А согласно разработанному методом итераций оптимизированному технологическому режиму - при температуре 940°C в течение 8 часов в атмосфере 100 % ацетилена (соотношение активной и пассивной стадий 2:28) - обеспечивает выполнение требований по контактной выносливости с коэффициентом безопасности, равным не менее 1,5 (рис. 1).

Концентрация углерода на поверхности в сталях данного класса поддерживается в доэвтектоидной области ($\leq 0,80\%$ по массе). В данном случае она составила 0,75 %, что обеспечило поверхностную твердость $HV = 750$ МПа. Эффективная толщина слоя (по критерию содержания углерода $\geq 0,40\%$ по массе или $HV \geq 510$ МПа) составила около 0,83 мм.

Оконный интерфейс программы использует следующие обозначения: « x , мм» – глубина слоя, мм; «Конц_С, %» – концентрация углерода (% по массе) на данной глубине слоя x ; «Предел_КВ» – $\sigma_{H \text{ lim}}$, МПа; «Spr» – $\sigma_{\text{пр}}$, МПа; «Spr[Kn=1,25]» и «Spr[Kn=1,50]» – $\sigma_{\text{пр}K_i}$ (МПа) при $K_i = 1,25$ и $K_i = 1,50$ соответственно (рис. 1).

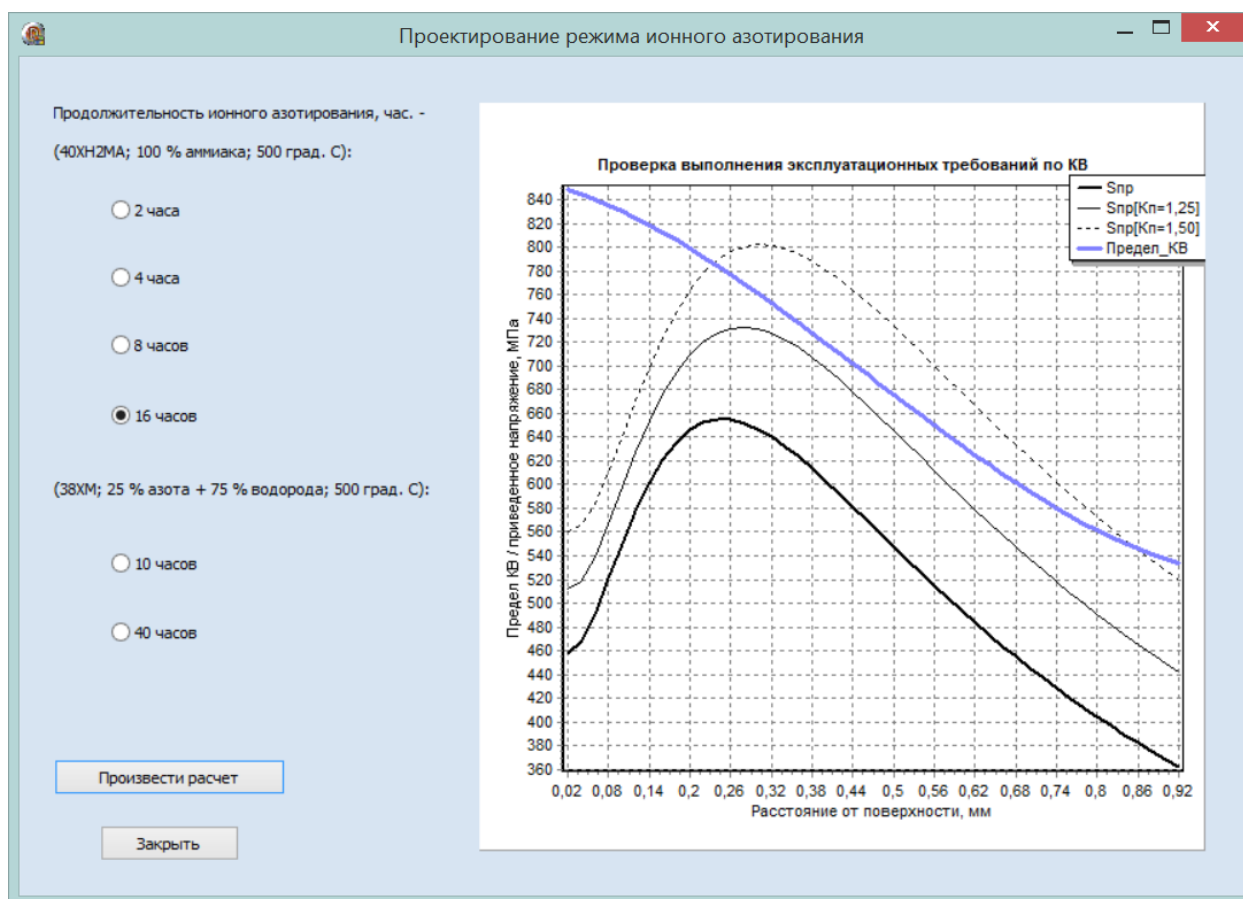


Рис. 2. Отображение на экране компьютера результатов расчета режима ионного азотирования, удовлетворяющих эксплуатационным требованиям по контактной выносливости с коэффициентом безопасности не менее 1,25

Результаты расчета также показали, что ионное азотирование стали 40ХН2МА при температуре 500 °С в атмосфере 100 % аммиака в течение 16 часов (технология № 1 [9]) обеспечивает выполнение требований по контактной выносливости с коэффициентом безопасности, равным 1,25, при эффективной толщине слоя, равной примерно 0,58 мм (по твердости), и поверхностном упрочнении до $HV = 680$ МПа (рис. 2).

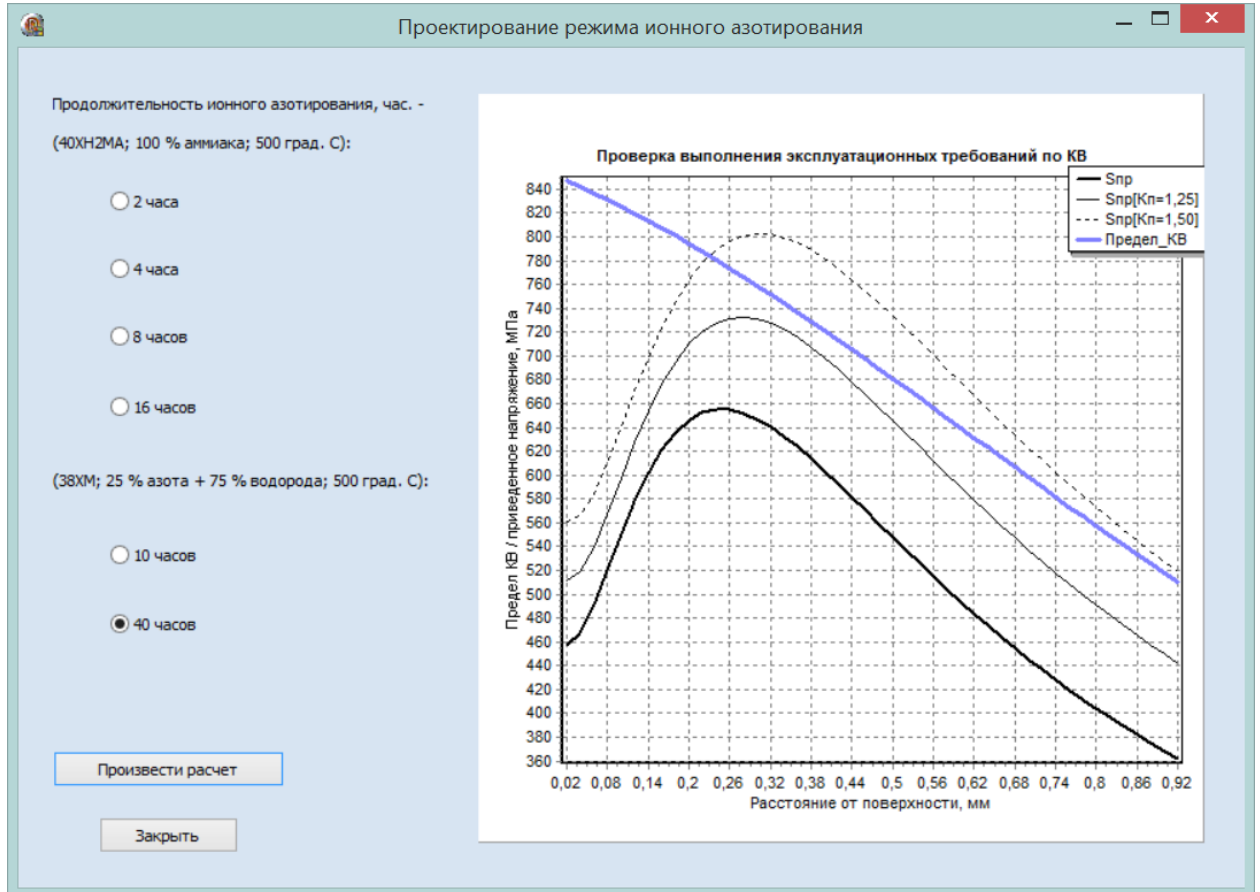


Рис. 3. Отображение на экране компьютера результатов расчета режима ионного азотирования, удовлетворяющих эксплуатационным требованиям по контактной выносливости с коэффициентом безопасности, равным не менее 1,25

Результаты расчета показали, что ионное азотирование стали 38ХМ при температуре 500 °С в азотно-водородной атмосфере (25 % N_2 и 75 % H_2) в течение 40 часов (технология № 2 [10]) обеспечивает выполнение требований по контактной выносливости с коэффициентом безопасности, равным не менее 1,25, при эффективной толщине слоя, равной приблизительно 0,60 мм, и твердости на поверхности $HV = 685$ МПа (рис. 3).

Таким образом, вакуумная цементация по сравнению с ионным азотированием обеспечивает уменьшение времени процесса ХТО и повышение коэффициента безопасности, а также более высокую твердость поверхности. Следовательно, для данной передачи рекомендуется применять вакуумную цементацию.

Если изменить исходные условия задачи и увеличить заданную распределенную нормальную нагрузку до 850 Н/мм, а модуль зубчатой передачи до 6 мм, то указанные процессы ионного азотирования по технологиям № 1 и 2 не обеспечивают выполнение условия (2) при коэффициенте безопасности, равном 1,25.

Коэффициент безопасности не менее 1,5 при твердости поверхности более 780 МПа и эффективной толщине слоя более 1,2 мм обеспечит проведение вакуумной цементации по следующему технологическому режиму: температура процесса - 940 °С; общая продолжительность ХТО - 18 часов; соотношение активной и пассивной стадий - 2:43.

В связи с изложенным вакуумная цементация может быть признана наиболее перспективным способом поверхностного упрочнения зубчатых колес тяжелой дорожной и строительной техники, обеспечивающим оптимальное соотношение цены и качества за счет снижения затрат на технологические газы (во время пассивных стадий они не подаются) и ускорение процесса за счет высокого углеродного потенциала на активных стадиях (до 1 % углерода). При этом по сравнению с обычными газовыми процессами обеспечивается более высокое качество насыщенного слоя, стабильность результатов, а также достижение отвечающего современным требованиям уровня культуры производства и экологической безопасности [11; 12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, С.И. Характер и причины разрушения шестерен дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин / С.И. Бондаренко, В.А. Карпенко, Е.А. Нестеренко [и др.] // Вестн. Харьков. нац. авто-моб. дорож. ун-та. - 2011. - Вып. 54. - С. 127-133.
2. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. - М.: Машиностроение, 1978. - 184 с.
3. Горицкий, В.М. Структура и усталостное разрушение металлов / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев. - М.: Металлургия, 1980. - 208 с.
4. Рыжов, Н.М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей / Н.М. Рыжов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2010. - № 7. - С. 39-45.
5. Семенов, М.Ю. Анализ способов упрочнения зубчатых колес из теплостойких сталей на основе расчетного метода / М.Ю. Семенов, И.Н. Гаврилин, М.Ю. Рыжова // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2014. - № 1 (703). - С. 42-46.
6. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия: [пер. с англ.] / К. Джонсон. - М.: Мир, 1989. - 512 с.
7. Семенов, М.Ю. Математическое моделирование процесса вакуумной цементации комплексно-легированных теплостойких сталей / М.Ю. Семенов, Л.П. Фомина // Авиационная промышленность. - 2011. - № 2. - С. 37-41.
8. Семенов, М.Ю. Управление строением цементованных слоев теплостойких сталей. Ч. I / М.Ю. Семенов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2013. - № 5(695). - С. 31-38.
9. Sule, Y.S. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel / Y.S. Sule, S. Kahraman, K. Erdinc // Materials Characterization. - 2008. - Vol. 59. - P. 351-358.
10. Li, C.X. Influence of nitriding time on the notch fatigue strength of plasma nitrided 709M40 steel / C.X. Li, Y. Sun, T. Bell // Journal of Materials Science Letters. - 2000. - Vol. 19. - P. 1793-1795.
11. Рыжов, Н.М. Особенности вакуумной цементации в ацетилене теплостойкой стали / Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов, Р.С. Фахуртдинов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2004. - № 6. - С. 10-15.
12. Рыжов, Н.М. Управление характеристиками диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей / Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов, Р.С. Фахуртдинов [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2004. - № 8. - С. 22-27.

Материал поступил в редколлегию 16.04.14.