ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.833:621.785.4.52

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук, А.А. ШИПКО, д-р техн. наук,
А.Л. ВАЛЬКО, О.В. КУЗЬМЕНКОВ
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТРАНСМИССИЙ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАШИН

Приведен новый подход к выбору технологических режимов химико-термического упрочнения зубчатых колес высокой долговечности. Предложены программные средства для проектирования высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин

Ключевые слова: *зубчатые колеса, технологические процессы, химико-техническая обработка, программное обеспечение*

Введение

Технология химико-термической обработки, являющаяся как финишная операция гарантом качества упрочняемых деталей, требует высокой культуры исполнения, четкого соблюдения параметров технологического процесса. Правильное проектирование и управление технологическим процессом ХТО зубчатых колес устраняют дефекты в структуре цементованного слоя и обеспечивают регламентированное качество продукции. Однако практика показывает, что, несмотря на высокий уровень автоматизации термического оборудования с управляющими компьютеризированными системами регулирования технологических процессов ХТО, процессы цементации (нитроцементации) в отечественном машиностроении имеют еще ряд недостатков. Одним из таких недостатков является то, что отечественные нормативные документы различных отраслей машиностроения (ТНПА, ГОСТ, ОСТ, СТП, РТМ, заводские инструкции) не охватывают всего диапазона структурных характеристик, ответственных за работоспособность высоконапряженных зубчатых колес. В нормативных показателях имеются существенные различия, которые обуславливают заметные расхождения при назначении оптимальной структуры, степени насыщения и толщины слоя и, таким образом, разный уровень качества химико-термического упрочнения зубчатых колес. Данный недостаток не позволяет предъявлять современные требования к приобретаемому импортному технологическому оборудованию и эффективно его использовать, что снижает качество обрабатываемых на данном оборудовании деталей [1].

Технические требования к качеству высоконапряженных зубчатых колес [2], базирующиеся на современных методиках металлографических исследований, не находят широкого применения из-за недостаточной обеспеченности заводских служб соответствующими руководящими техническими материалами и оснащенности современным металловедческим оборудованием. Не уделяется также должного внимания проектированию технологических процессов химико-термической обработки, обеспечивающих требуемое качество и заданный ресурс обрабатываемых деталей.

Цель работы — разработка методики и программных средств проектирования высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин.

Результаты исследований

Комплексные металлографические исследования зубчатых колес ведущих фирм (ОАО «МЗКТ», ПО «МТЗ», ОАО «Уралтрак», Катерпиллер, Мерседес, Комацу, Юнит Риг) показывают, что достижение требуемого качества упрочнения, а, следовательно, и высоких эксплуатационных свойств зубчатых передач, возможно лишь при правильном выборе стали и применении уникальных автоматизированных технологий ХТО. Какой бы совершенной не была химико-термическая обработка, из-за металлургических дефектов стали ресурс деталей может быть понижен в 3—5 раз [3]. Поэтому выбор технических требований на поставку марки стали является особенно важным, так как исходный материал предопределяет многие выходные характеристики зубчатых колес через проявление факторов технологической наследственности. Разработаны технические требования на поставку стали для высоконапряженных зубчатых колес, которые включают:

© Руденко С.П., Шипко А.А., Валько А.Л., Кузьменков О.В., 2011

1. Сталь с нормированной прокаливаемостью $П = \frac{30-43}{10}$.

2. Величина действительного аустенитного зерна не крупнее № 6 по ГОСТ 5639-82.

3. Макроструктура должна соответствовать требованиям ГОСТ4543-71 для высококачественной стали.

4. Прокат поставляется с контролем полосчатости, ферритно-перлитной и видманштедтовой структуры. Полосчатость не более 3-го балла по шкале Б ГОСТ 5640-68.

5. Прокат поставляется в термически обработанном отожженном состоянии с твердостью не более 255 НВ ($d_{отп}$≥3,8 мм).

6. Прокат поставляется с нормированной чистотой по неметаллическим включениям по ГОСТ 1778-70:
по силикатам, оксидам точечным, глобулям — по среднему баллу не более 2, по максимальному — не более 2,5;
по оксидам строчечным — по среднему баллу не более 2,5, по максимальному — не более 3;
по сульфидам — по среднему баллу не более 3, по максимальному — не более 3,5.

Исследования показали [4], что разработка технологических режимов химико-термической обработки, обеспечивающих регламентированное качество структуры высоконагруженных зубчатых колес, должна основываться на результатах оценки прокаливаемости и закаливаемости цементованных слоев и сердцевины зубчатых колес из конкретной марки стали с учетом размера и формы шестерни и особенностей оборудования, на котором осуществляется химико-термическая обработка. Для реализации разработанной технологии ХТО печное оборудование должно быть оснащено компьютеризированными системами контроля и регулирования углеродного потенциала технологической атмосферы и закалочными агрегатами с регулируемой охлаждающей способностью.

На основании полученных результатов разработана методология проектирования технологических процессов ХТО зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин, реализованная в виде методического и программного обеспечения расчета режимных параметров химико-термического упрочнения с учетом прокаливаемости стали, размера и формы зубчатых колес, экспериментальных данных обследования газовых режимов и охлаждающей способности закалочных баков промышленных печей.

Начальным этапом проектирования технологических процессов ХТО является определение требуемой величины микротвердости и ее распределения по упрочненному слою, обеспечивающие при оптимальной структуре заданный ресурс зубчатых колес. В основу методики определения распределения микротвердости в упрочненном слое положена экспериментально доказанная и теоретически обоснованная гипотеза о том, что критерием работоспособности высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин являются глубинные контактные разрушения поверхностей зубьев [5, 6]. Требуемое распределение микротвердости по толщине слоя поверхностно-упрочненных зубчатых колес определяется путем расчета ресурса в каждой зоне упрочненного слоя и сравнения полученного значения с заданной величиной долговечности. Ресурс, обеспечиваемый сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев, определяется по методике [7], разработанной с учетом экспериментальных данных по влиянию качества структуры упрочненных слоев на контактную выносливость зубьев и реализованной в виде компьютерной программы «LongLife» (рисунок 1).

Результаты расчета по предлагаемой методике представляются в табличной форме или в виде графика (рисунок 2). Расчетные значения ресурса выводятся для заданных значений микротвердости в диапазоне от 600 до 860 HV по всей глубине упрочненного слоя с интервалом через 0,1 мм. Представляемые в таком виде данные позволяют определять: глубину опасной зоны с наименьшим ресурсом, необходимую для назначения эффективной толщины упрочненного слоя; ресурс зубчатых колес, обеспечиваемый сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев; требуемую величину микротвердости и ее распределение по упрочненному слою, обеспечивающие заданный ресурс.

Возможность получения регламентированного распределения твердости по толщине слоя определяется распределением углерода в слое, прокаливаемостью стали, а также интенсивностью охлаждения при закалке, которая связана как с характеристиками закалочного оборудования, так и с размерами и формой деталей. Поэтому следующим этапом разработки технологического процесса ХТО является определение распределения углерода в слое, обеспечивающее требуемое распределение микротвердости после проведения полного цикла ХТО. На этом этапе определяется прокаливаемость поставляемой стали в зависимости от ее химического состава экспериментальным методом [8], или аналитически с использованием программы «SteelPro» (рисунок 3).

При определении распределения углерода важное значения приобретают результаты оценки прокаливае-

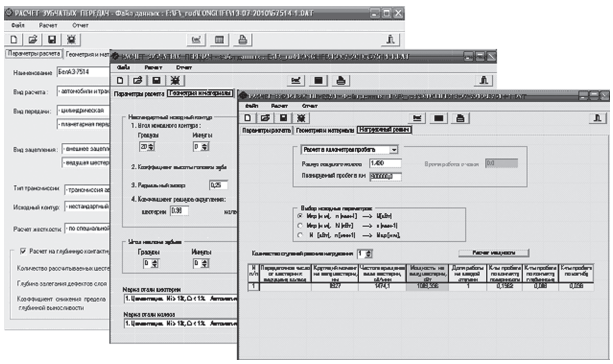

Рисунок 1 — Окна ввода исходных данных программы «LongLife»

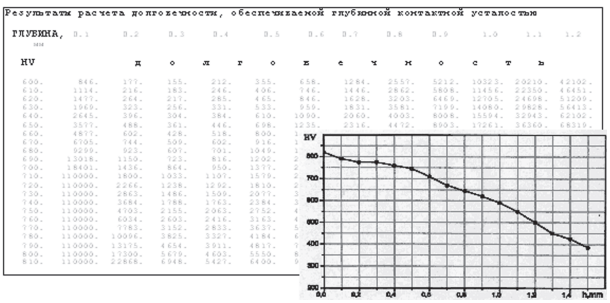

Рисунок 2 — Окна вывода результатов расчета программы «LongLife»

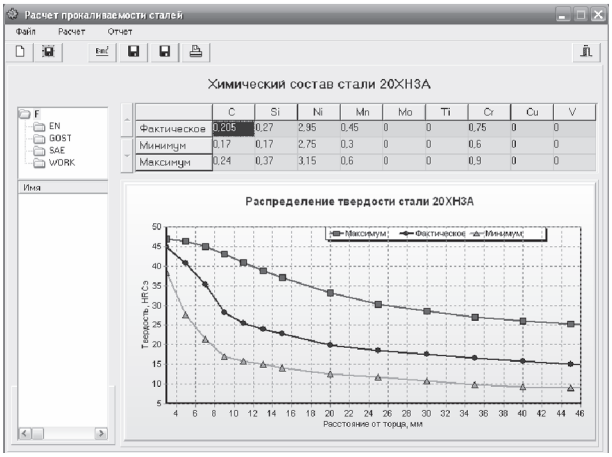

Рисунок 3 — Главное окно программы «SteelPro»

мости цементованных слоев, которые, как правило, получают на торцовых образцах. Кривые прокаливаемости отражают изменение твердости по толщине упрочненного слоя в зависимости от расстояния от охлаждаемого торца цементованного образца. В таком состоянии кривые прокаливаемости характеризуют свойства данной марки стали, но не позволяют непосредственно оценить прокаливаемость слоя зубчатого колеса, поскольку глубина упрочнения при закалке определяется не только прокаливаемостью самой стали, но и размером и формой изделия, а также интенсивностью охлаждения при закалке, которая характеризует охлаждающую способность закалочных агрегатов.

Для определения соответствия между распределением твердости на торцовом образце и по толщине слоя в изделии с учетом размера и формы зубчатых колес использованы экспериментально-аналитические зависимости [9], полученные при различной интенсивности охлаждения в закалочном устройстве (рисунок 4).

Для учета размера и формы зубчатого колеса вводится понятие характеристический размер «S», эквивалентное понятию критический диаметр изделия. Конкретное значение характеристического размера определяют из чертежа зубчатого колеса по рекомендациям [9, 10]. С использованием результатов оценки прокаливаемости цементованных слоев и зависимостей, связывающих прокаливаемость торцового образца с прокаливаемостью зубчатого колеса конкретного типоразмера, разработана методика расчета распределения углерода в слое, обеспечивающего требуемое распределение микротвердости после проведения полного цикла ХТО, реализованная в программе «Carb» (рисунок 5).

Следующим этапом проектирования технологического процесса ХТО является разработка температурно-временного режима цементации и выбор углеродного потенциала насыщающей атмосферы. Эта задача решается на основе математического моделирования процессов диффузии углерода в стали с учетом экспериментально полученных коэффициентов массопереноса и диффузии углерода, влияния легирующих элементов, величины и точности регулирования углеродного потенциала печной атмосферы (программа «RegHard» рисунок 6).

При использовании разработанной программы «RegHard» в исходных данных задают температуру и продолжительность насыщения, коэффициент диффузии углерода с учетом влияния легирующих элементов, углеродный потенциал атмосферы с учетом точности его регулирования, содержание углерода в исходном металле, коэффициент массопереноса и выполняют вычисления при изменении тех или иных технологических параметров. По результатам расчета проводят необходимую корректировку температурно-временных параметров, которые обеспечивают получение требуемого распределения углерода по толщине слоя.

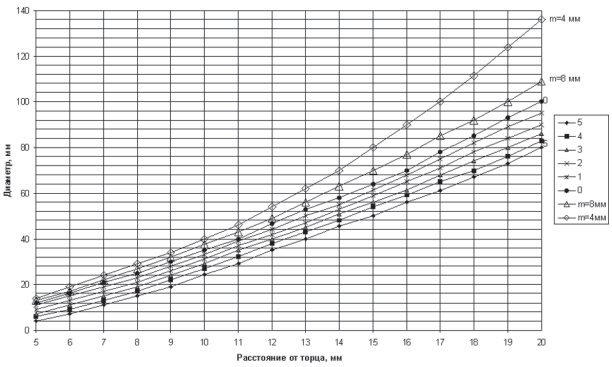

Рисунок 4 — Зависимость между диаметром изделия (характеристическим размером для вала—шестерни) и расстоянием от торца торцового образца для различного расстояния от поверхности (от 0 до 5 мм) и по среднему сечению ножки зуба различных модулей (от 4 до 8 мм) при интенсивности закалки *H*=0,3

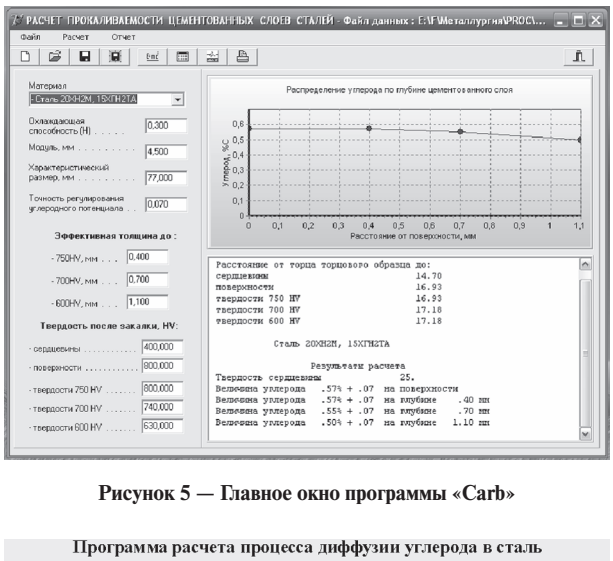

Рисунок 5 — Главное окно программы «Carb»

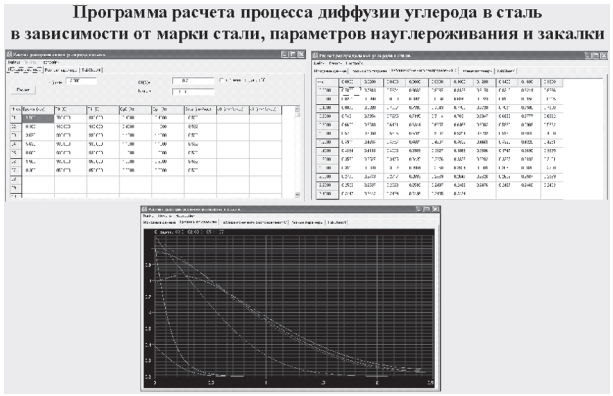

Рисунок 6 — Окно ввода исходных данных и результаты расчета кинетики диффузии углерода по толщине слоя программы «RegHard»

Заключение

Разработан программно-методический комплекс проектирования высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин путем формирования бездефектной структуры упрочненных слоев зубчатых колес с требуемыми характеристиками сопротивления усталости, обеспечивающими заданную долговечность.

Разработка на стадии проектирования технологии ХТО, обеспечивающей требуемое качество упрочнения и заданный ресурс деталей, позволяет существенно сократить работы по корректировке отдельных стадий технологии и избежать дорогостоящего метода проб и ошибок при экспериментальной отработке технологического процесса химико-термической обработки.

Список литературы

1. Гурченко, П.С. Исследование и повышение эффективности ХТО шестерен ведущих мостов автотехники МАЗ / П.С. Гурченко, А.Д. Волков // Инженер-механик. — 2005. — № 4(29). — С. 16—19.
2. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / В.Е.Антонюк [и др.]; под общ. ред. В.Е. Старжинского, М.М. Кане. — СПб.: Профессия, 2007. — 832 с.
3. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. — М.: Из-во МГТУ им. Баумана, 2001. — 303 с.
4. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Беларус. навука, 1999. — 175 с.
5. Тескер, Е.И. Теория и методы расчета на контактную прочность поверхностно упрочненных зубчатых передач: дис. ... д-ра техн. наук / Е.И. Тескер. — Волгоград, 1988. — 418 с.
6. Руденко, С.П. Исследование сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С.П. Руденко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2009. — № 4. — С. 48—53.
7. Руденко, С.П. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом качества химико-термического упрочнения / С.П. Руденко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 4. — С. 58—60.
8. Расчет прокаливаемости цементованных слоев конструкционных сталей / С.П. Руденко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2010. — № 3. — С. 5—10.
9. Wyss, J. Bezichung zwischen Hurteverlant an der stirnabshreckprobe und Harteannahme groberer einsatzgeharteter kitzel / J. Wyss // Harterei. — Technic und Warmebehandlung. — 1959. — № 2.
10. Технология термической обработки стали: перевод с нем. Б.Е. Левина; под ред. Бернштейна. — М., 1981. — 608 с.

Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L., Kuzmenkov O.V.

Designing of highly effective technological processes of chemical heat treatment of the vehicles transmission gears

The new approach is led to a choice of technological modes of chemical heat treatment of high durability gears. Software for designing of highly effective technological processes of chemical heat treatment of the vehicles transmission gears are offered.

Поступила в редакцию 21.01.2011