

УДК 621.833:621.785.4.52

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО
старший научный сотрудник¹
E-mail: valcoalex@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.04.2017.

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Предложен новый подход к разработке режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономнолегированной стали. Показано безусловное преимущество экономнолегированной стали перед высоколегированной хромоникелевой сталью 20ХН3А, широко применяемой в машиностроении.

Ключевые слова: конструкционные стали, химико-термическая обработка, цементованные слои, микротвердость, распределение углерода

Введение. Правильный выбор материала и соответствующих методов термообработки является одной из главных предпосылок, гарантирующих достижение требуемых эксплуатационных свойств деталей. Особенно это относится к высоконапряженным зубчатым колесам трансмиссий энергонасыщенной автотракторной техники. Согласно ГОСТ 30634-99 эффективная толщина упрочненного слоя после химико-термической обработки таких колес должна быть обеспечена для значений микротвердости 750, 700 и 600 HV_{0,2}.

В настоящее время для изготовления зубчатых колес трансмиссий мобильных машин широкое применение находит сталь 20ХН3А. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя исследованных образцов из данной стали после полного цикла химико-термической обработки в камерных печах «Ipsen» приведено на рисунке 1 [1]. Из имеющихся данных видно, что разброс значений поверхностной микротвердости упрочненного слоя зубчатых колес значителен (700–750 HV_{0,2}), а на большей части исследованных образцов (>50 %) отсутствует эффективная толщина для значений микротвердости 750 HV_{0,2}. Регламентирование указанного показателя является гарантией обеспечения требуемых характеристик сопротивления усталости высоконапряженных зубчатых колес [2, 3].

Повышенные требования к эксплуатационным характеристикам зубчатых колес обуславливают разработку и использование в промышленности новых эффективных марок сталей, обладающих повышенными механическими свойствами. Примером такой стали является экономнолегированная конструкционная сталь 20ХГНМБА (таб-

лица 1), разработанная для зубчатых колес короб передач тракторов «Беларус» [4].

Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономнолегированной стали является ответственным этапом, определяющим не только твердость и структуру зубчатых колес, но и продолжительность процесса и его энергозатратность.

Определение требуемой величины микротвердости и ее распределения по упрочненному слою, обеспечивающих при формировании оптимальной структуры заданный ресурс зубчатых колес, является начальным этапом разработки технологических режимов химико-термической обработки.

Требуемое распределение микротвердости по толщине слоя поверхностно-упрочненных зубчатых колес определяется путем расчета ресурса в каждой зоне упрочненного слоя зубьев и сравнения полученного значения с заданной регламен-

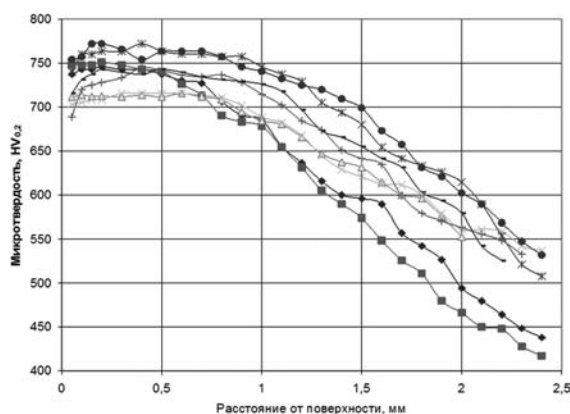


Рисунок 1 — Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя образцов из стали 20ХН3А после химико-термической обработки на печах «Ipsen»

Таблица 1 — Химический состав стали 20ХГНМБА

Химический состав, %									
C	Si	Ni	Mn	Mo	Ti	Cr	Cu	V	Nb
0,2	0,35	0,65	0,97	0,22	0,00	0,71	0,12	0,003	0,040

тированной величиной. Ресурс, обеспечиваемый сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев, определяется по методике [5], разработанной с учетом экспериментальных данных по влиянию качества структуры упрочненных слоев на контактную выносливость зубьев и реализованной в виде компьютерной программы GearProg [6]. Результаты расчета по предлагаемой методике представляются в табличной форме (таблица 2).

Расчетные значения ресурса выводятся для заданных значений микротвердости в диапазоне от 600 до 800 HV_{0,2} по всей глубине упрочненного слоя с интервалом через 0,1 мм. Представляемые в таком виде данные позволяют определять глубину опасной зоны с наименьшим ресурсом, которая необходима 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, обеспечи-

Таблица 2 — Результаты расчета ресурса (в моточасах) ведущей шестерни коробки передач, обеспечиваемого сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев

HV _{0,2}	Цементованный слой					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
600	216	71	93	191	478	3740
610	279	85	108	218	538	4406
620	361	102	125	248	605	5186
630	471	123	145	282	681	6099
640	617	147	168	321	765	*
650	815	178	196	366	859	*
660	2900	214	228	417	965	*
670	4506	259	265	475	1084	*
680	*	314	308	541	3430	*
690	*	381	359	616	4079	*
700	*	464	419	701	4850	*
710	*	567	489	799	5766	*
720	*	694	572	911	6854	*
730	*	853	669	1039	*	*
740	*	1052	784	3298	*	*
750	*	3810	920	4020	*	*
760	*	5277	1081	4905	*	*
770	*-	*	3668	5989	*	*
780	*	*	4691	*	*	*
790	*	*	*	*	*	*
800	*	*	*	*	*	*

вающие заданный ресурс. В таблице 2 представлены результаты расчета ресурса ведущей шестерни ($m = 4,5$ мм, $z = 20$, $x = 0,763$) коробки передач трактора «Беларус», обеспечиваемого сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев.

Заданный ресурс шестерни, соответствующий 10 000 моточасам в эксплуатации, составляет $L = 830$ ч. По таблице 2 получаем, что для обеспечения заданного ресурса эффективная толщина упрочненного слоя должна составлять 0,3 мм до микротвердости 750 HV_{0,2}, 0,5 мм — до 700 HV_{0,2}, 0,6 мм — до 600 HV_{0,2}.

Определение распределения углерода в слое. Возможность получения регламентированного распределения микротвердости по толщине диффузионного 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 режимов химико-термической обработки является определение распределения углерода в слое, обеспечивающего заданное распределение микротвердости после проведения полного цикла обработки. На этом этапе большое значение приобретают результаты оценки прокаливаемости цементованных слоев, которые, как правило, получают на стандартных 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 упрочненного слоя зуба зубчатого колеса, поскольку глубина упрочнения при закалке определяется не только прокаливаемостью самой стали, но и размером изделия, а также интенсивностью охлаждения при закалке, которая характеризует охлаждающую способность закалочных агрегатов. Поэтому соответствие между распределением твердости на торцевом образце и в сечении зуба зубчатого колеса с учетом интенсивности охлаждения H устанавливается по рисунку 2, по которому в зависимости от модуля зубчатого колеса находят расстояния от торца торцового образца, соответствующие одинаковым скоростям охлаждения на поверхности и в сердцевине зуба. Для модуля зубчатого колеса $m = 4,5$ мм имеем, что твердость поверхности зуба шестерни соответствует твердости торцового образца на расстоянии 4 мм от торца, а твердость сердцевины — на расстоянии 11 мм при интенсивности охлаждения $H = 0,3$.

По полученным расстояниям от торца с использованием изоуглеродных диаграмм прокаливаемости определяется содержание углерода

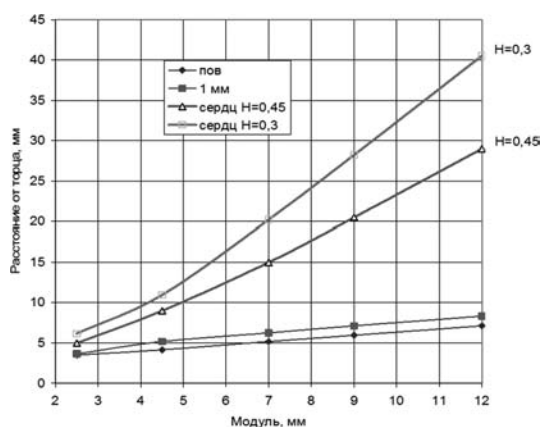


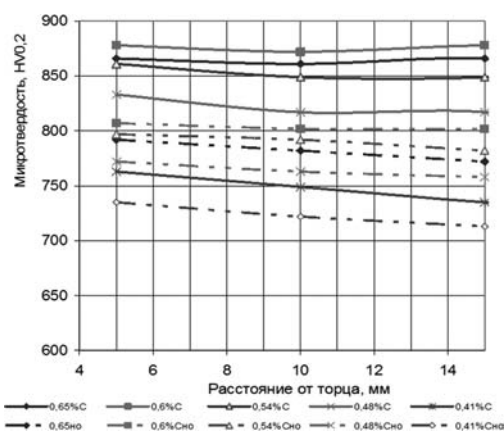
Рисунок 2 — Соответствие между распределением твердости на торцевом образце и в сечении зуба зубчатого колеса

в слое, обеспечивающее требуемое распределение микротвердости по толщине цементованных слоев после проведения полного цикла упрочняющей обработки.

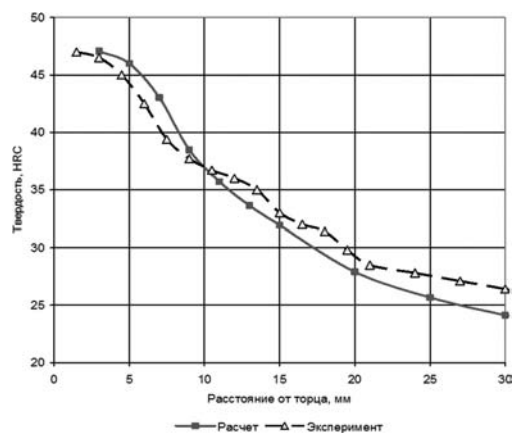
По диаграммам прокаливаемости цементованного слоя стали 20ХГНМБА (рисунок 3 а) получаем, что микротвердость упрочненного слоя 790–810 HV_{0,2} обеспечивается после низкого отпуска (пунктирные линии) при содержании углерода 0,54–0,60 %, а микротвердость 700 HV_{0,2} — при содержании углерода 0,40 %, Твердость сердцевины на расстоянии от торца 11 мм (см. рисунок 3 б) составляет 36 HRC при содержании углерода 0,2 %. (см. таблицу 1).

Разработка температурно-временного режима цементации и выбор углеродного потенциала насыщающей атмосферы. Эта задача решается на основе математического моделирования процесса диффузии углерода в стали с помощью программы DCarb [2]. Модель основана на известном уравнении массопереноса углерода из насыщающей атмосферы в сталь с использованием коэффициента массоотдачи (β), определяемого экспериментально для конкретной лабораторной или промышленной печи, и позволяет описывать кинетику изменения концентрации углерода по глубине слоя в зависимости от параметров технологического процесса цементации (углеродного потенциала печной атмосферы, ее состава, температуры, выдержки и т. п.).

Режим цементации складывается из пяти стадий (таблица 3). На первой стадии производится нагрев деталей до заданной рабочей температуры в течение 1,0 ч с 700 °С до 930 °С при повышении углеродного потенциала (C_g) от 0 до 0,8 %. Вторая стадия соответствует выдержке при температуре 930 °С в течение 1 ч при дальнейшем повышении углеродного потенциала с $C_g = 0,8$ % до $C_g = 1,0$ %. Третья стадия — активное насыщение, формирующее цементованный слой заданной глубины 1,2–1,4 мм до полупереходной зоны с содержанием углерода 0,37 %, в течение 8 ч при постоянной температуре 930 °С и углеродном потенциале



а



б

Рисунок 3 — Прокаливаемость стали 20ХГНМБА: а — изотермические диаграммы прокаливаемости цементованного слоя (сплошные линии — после закалки, пунктирные — после низкого отпуска); б — сердцевины

$C_g = 1,0$ %. Четвертая стадия — подстуживание до температуры закалки, при которой в течение 1,3 ч происходит снижение температуры до 860 °С и углеродного потенциала C_g до 0,65 %. Пятая заключительная стадия характеризует диффузионное выравнивание и формирует окончательное распределение углерода в диффузионном слое в соответствии с разработанными требованиями при выдержке в течение 1,5 ч при постоянном углеродном потенциале $C_g = 0,65$ % и температуре 860 °С.

Профиль конечного распределения углерода в цементованном слое обрабатываемых деталей показан на рисунке 4, на котором цифрами обозначены кривые распределения углерода на промежуточных стадиях процесса цементации.

Таблица 3 — Режим цементации зубчатых колес из стали 20ХГНМБА

№ ст.	Время (час)	T0 (C)	T1 (C)	Cg0 (%)	Cg1 (%)
01	1.000	700.000	930.000	0.0000	0.8000
02	1.000	930.000	930.000	0.8000	1.0000
03	8.000	930.000	930.000	1.0000	1.0000
04	1.300	930.000	860.000	1.0000	0.6500
05	1.500	860.000	860.000	0.6500	0.6500

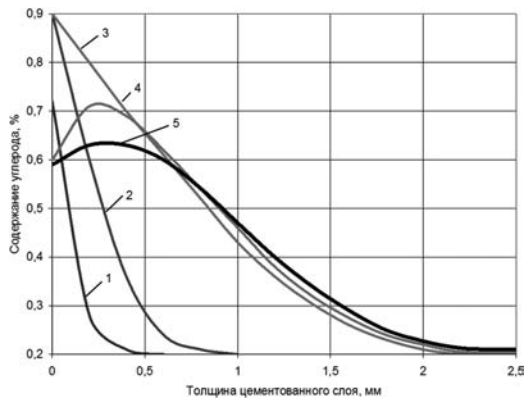


Рисунок 4 — Профиль распределения углерода в цементованном слое на стадиях процесса цементации

Требуемая величина поверхностной концентрации углерода 0,6 % распространяется на толщину слоя до 0,6 мм, формируя тем самым при закалке необходимую величину микротвердости в опасной зоне упрочненного слоя, обеспечивающую заданный ресурс зубчатых колес. Требуемая толщина цементованного слоя до полупереходной зоны 1,3 мм обеспечивается при содержании углерода 0,37 %.

Современные цементационные агрегаты «Irsen», которыми оснащены большинство машиностроительных предприятий Республики Беларусь, снабжены системой управления технологическими параметрами процесса химико-термической обработки «Carb-O-Prof 4.0», которая выполняет контроль и регулирование температуры, углеродного потенциала и длительности выдержки в камерах печей согласно задаваемым параметрам. Одной из форм окончания процесса цементации по данной управляющей системе является полное совпадение кривой распределения углерода по толщине цементованного слоя с эталонной кривой, полученной при моделировании процесса диффузии углерода в стали по компьютерной программе, аналогичной программе DCarb.

Цементационные агрегаты «Irsen» оснащаются встроенным закалочным баком, поэтому после подстуживания производится непосредственная закалка в масло высокой вязкости МС-20 и последующий низкий отпуск при 170 °С в течение 3 ч.

После полного цикла химико-термической обработки поверхностная твердость упрочненного слоя зубчатых колес составляла 63–64 HRC, сердцевины — 32–34 HRC. Величина действительного зерна в цементованном слое № 10–11 по ГОСТ-5639, в сердцевине — № 9. Толщина цементованного слоя до полупереходной зоны составила 1,3 мм. Эффективная толщина слоя с микротвердостью 750 HV_{0,2} — 0,65 мм; 700 HV_{0,2} — 0,8 мм, 600 HV_{0,2} — 1,2 мм (рисунок 5). Микроструктура цементованного слоя состояла из мелкоигльчатого мартенсита и остаточного аустенита 2 балла. Микроструктура сердцевины — сорбит.

В отличие от экономнолегированных сталей (содержание никеля до 1 %) хромоникелевые

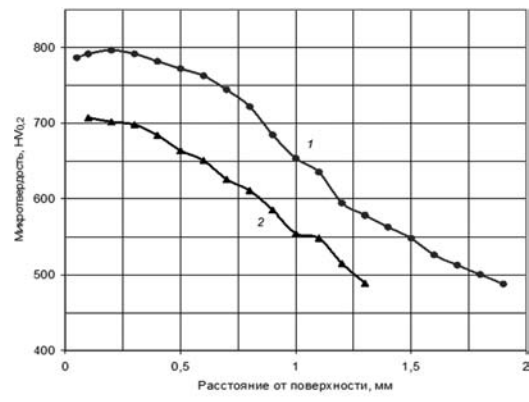


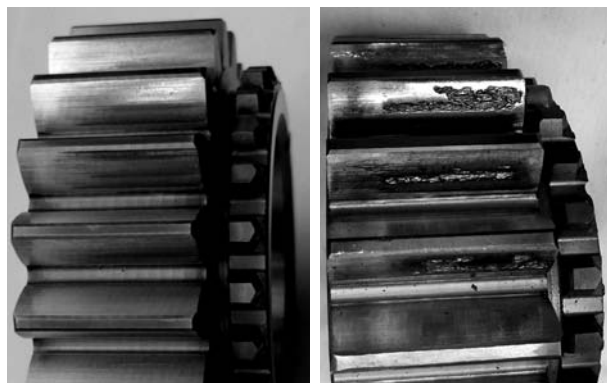
Рисунок 5 — Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя зубчатых колес из стали 20ХГНМБА (1) и 20ХНЗА (2) после ХТО на камерных печах «Irsen»

стали с высоким содержанием никеля 20ХНЗА, 20Х2Н4А нельзя подвергать непосредственной закалке после цементации, так как это приводит к образованию большого количества остаточного аустенита в цементованном слое, что ухудшает его свойства. Для уменьшения количества остаточного аустенита перед закалкой проводится высокий отпуск при температуре 650 °С, что значительно увеличивает продолжительность процесса химико-термической обработки. В связи с этим цементация с непосредственной закалкой экономнолегированных сталей позволяет повысить производительность технологического процесса и снизить затраты на обработку.

Эффективность нового подхода к разработке режимов химико-термической обработки подтверждена результатами сравнительных стендовых испытаний зубчатых колес из сталей 20ХНЗА и 20ХГНМБА. Зубчатое колесо, изготовленное из стали 20ХГНМБА, отработало полный цикл испытаний при максимальном контактном напряжении в полюсе зацепления 1700 МПа в объеме 340 ч без замечаний (рисунок 6 а).

Зубчатое колесо, изготовленное из серийной стали 20ХНЗА, отработало при том же режиме 300 ч и было преждевременно снято с испытаний вследствие прогрессирующего глубинного контактного выкрашивания (см. рисунок 6 б). Химико-термическая обработка зубчатых колес из стали 20ХНЗА выполнялась на тех же агрегатах «Irsen» по серийным технологическим режимам без проведения высокого отпуска перед закалкой. Качество обработки удовлетворяло требованиям технической документации: поверхностная твердость 58 HRC, толщина цементованного слоя 1,1 мм.

Заключение. Предложен новый подход к разработке режимов химико-термической обработки зубчатых колес, основанный на прогнозировании распределения микротвердости по толщине упрочненного слоя, обеспечивающего заданный эксплуатационный ресурс, определении степени насыщения слоя углеродом с учетом прока-



а б
Рисунок 6 — Общий вид шестерни из стали 20ХГНМБА (а) после стендовых испытаний в течение 340 ч; стали 20ХН3А (б) после стендовых испытаний в течение 300 ч

ливаемости цементованного слоя и сердцевины зубчатых колес, математическом моделировании процесса диффузии углерода в стали и определении с учетом кинетики изменения концентрации углерода по слою параметров технологического процесса цементации (углеродного потенциала печной атмосферы, температуры, выдержки).

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: sprud.47@mail.ru.

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher¹

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 27 April 2017.

DEVELOPMENT OF THE REGIMES OF CHEMICAL HEAT TREATMENT OF GEAR WHEELS FROM SPARINGLY ALLOYED STEEL

The new approach to development of regimes of chemical heat treatment of gear wheels from sparingly alloyed steels is offered. The unconditional advantage of sparingly alloyed steel before high-alloy chromium-nickel steel 20XH3A, widely applied in engineering industry, is displayed.

Keywords: structural steels, chemical heat treatment, carburized layers, microhardness, carbon distribution

References

1. Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A., Bylickij V.V., Karpovich P.G. Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik zubchatyh koles karernyh samosvalov posredstvom optimizacii rezhimov himiko-termicheskoj obrabotki [Raise of operational characteristics of gears of career dump trucks by means of optimisation of regimes of chemical heat treatment]. *Litjo i metallurgija* [Foundry production and metallurgy], 2013, no. 2, pp. 110–114.
2. Rudenko, S.P., Valko A.L., Mosunov E.I. Tehnicheskie trebovanija k kachestvu cementovannyh sloev zubchatyh koles transmissij jenergonasyshennyh mashin [Technical requirements to quality of carburized layers of gears of power sated cars]. *Avtomobilnaja promyshlennost* [Automotive industry], 2011, no. 9, pp. 33–36.
3. Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин* [Contact fatigue of transmissions gearwheels of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaja navuka, 2014. 126 p.
4. Rudenko S.P., Valko A.L., Dudeckaja L.R., Emeljanovich I.V. Novaja cementuemaja stal s reglamentirujemoj prokalivaemostju dlja zubchatyh koles transmissij [New carburized steel with regulated hardenability for gears of transmissions]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2013, no. 3, pp. 57–61.
5. Rudenko S.P., Valko A.L. Osobennosti rascheta zubchatyh koles transmissij na glubinnuju kontaktuju vynoslivost [Feature of calculation of toothed wheels of transmissions on deep-seated contact endurance]. *Vestnik mashinostroenija* [Bulletin of mechanical engineering], 2015, no. 11, pp. 5–7.