



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-113-120>
УДК 669.15

Поступила 06.12.2021
Received 06.12.2021

КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕДЕЛА

С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, П. И. ПАПКОВСКИЙ, С. Г. САНДОМИРСКИЙ,

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12.
E-mail: sprud.47@mail.ru

П. Г. КАРПОВИЧ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»,
г. Жодино, Беларусь

Обоснованы преимущества экономнолегированных сталей для изготовления крупномодульных зубчатых колес. Проведена опытно-промышленная проверка качества изготовления зубчатых колес из проката новой конструкционной экономнолегированной стали 21ХГНМБА на всех этапах технологического передела в условиях серийного производства. Показана эффективность разработанных технологических процессов предварительной термической обработки заготовок и химико-термической обработки зубчатых колес. Даны рекомендации по выбору абразивного инструмента для шлифования поверхностно-упрочненных зубчатых колес из экономнолегированной стали.

Ключевые слова. Экономнолегированная сталь, цементуемые зубчатые колеса, предварительная термическая обработка, химико-термическая обработка, технологический передел, качество изготовления, опытно-промышленная проверка.

Для цитирования. Руденко, С. П. Качество изготовления зубчатых колес из экономнолегированной стали на всех этапах технологического передела / С. П. Руденко, А. Л. Валько, П. И. Папковский, С. Г. Сандомирский, П. Г. Карпович // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 113–120. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-113-120>.

QUALITY OF MANUFACTURING OF GEARS FROM SPARINGLY ALLOYED STEEL AT ALL STAGES OF TECHNOLOGICAL CONVERSION

S. P. RUDENKO, A. L. VALKO, P. I. PAPKOVSKI, S. G. SANDOMIRSKI,

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaja str. E-mail: sprud.47@mail.ru

P. G. KARPOVICH, Open Joint Stock Company «BELAZ» – Management Company of the Holding «BELAZ-HOLDING», Zhodino, Belarus

The advantages of sparingly alloyed steels for the manufacture of large-module gears are substantiated. A test output quality control of the manufacture of gears from rolled new structural sparingly alloyed steel 21ХГНМБА (21KhGNMBA) was carried out at all stages of technological conversion in the conditions of serial production. The efficiency of the developed technological processes of preliminary heat treatment of workpieces and chemical-thermal treatment of gears is shown. A significant reduction in the labor intensity of these processes is achieved in comparison with the processes of chemical-thermal treatment of steels with a high nickel content. Recommendations are given on the choice of an abrasive tool for grinding surface-hardened gears made of economically alloyed steel.

Keywords. Economically alloyed steel, cemented gears, preliminary heat treatment, chemical and thermal processing, technological conversion, manufacturing quality, pilot testing.

For citation. Rudenko S. P., Valko A. L., Papkovski P. I., Sandomirski S. G., Karpovich P. G. Quality of manufacturing of gears from sparingly alloyed steel at all stages of technological conversion. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 1, pp. 113–120. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-113-120>.

Актуальным направлением в обеспечении ресурса высоконапряженных деталей является применение экономнолегированных сталей для зубчатых колес трансмиссий мобильных машин, что позволяет снизить стоимость материала, производственные затраты при проведении термической обработки, повысить долговечность деталей за счет увеличения качества поверхностного упрочнения и пределов выносливости материала [1–4]. Основным отличием экономнолегированных конструкционных сталей

является пониженное содержание никеля и наличие микродобавок легирующих карбидообразующих элементов. При этом суммарное содержание основных легирующих элементов не превышает 3% [2, 4].

Для зубчатых колес планетарных передач карьерных самосвалов БЕЛАЗ разработан и предложен состав экономнолегированной стали с требуемым уровнем прочности и запасом вязкости [5]. Новая сталь отличается от известных материалов не только составом (табл. 1), но и технологическими особенностями изготовления деталей из нее.

Таблица 1. Химический состав стали 21ХГНМБА

Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu	Nb	Ca
							не более				
21ХГНМБА	0,19–0,22	0,17–0,37	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	0,4–0,5	0,015	0,015	0,25	0,05–0,08	0,002–0,02

В процессе исследований крупномодульных зубчатых колес, изготовленных из экономнолегированной стали типа 21ХГНМБА и высоколегированных хромоникелевых сталей типа 20Х2Н4А, показано, что коробление после ХТО зубчатых колес из высоколегированной стали 20Х2Н4А в 2,0–2,5 раза больше, чем из экономнолегированной стали 21ХГНМБА (рис. 1) [6]. Установлено, что основным недостатком зубчатых колес, изготавливаемых из высоколегированных хромоникелевых сталей, является повышенная кинематическая погрешность после химико-термической обработки, которая приводит к неравномерному съему припуска при шлифовании зубьев. Это способствует снижению сопротивления глубинной контактной усталости в локальных зонах диффузионных слоев зубьев. Неравномерный съем металла при шлифовании зубьев зубчатых колес с повышенными предельными отклонениями шага зацепления и радиального биения приводит к появлению «слабого» зуба с пониженными механическими свойствами в опасной зоне упрочненного слоя.

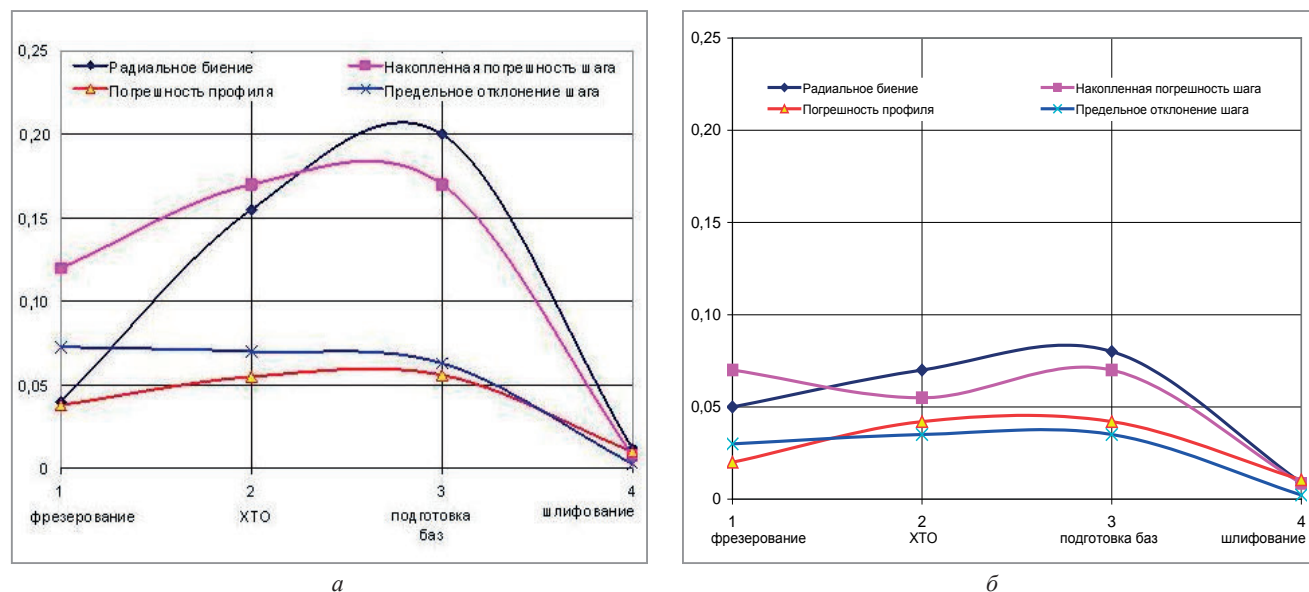


Рис. 1. Точность изготовления на разных стадиях технологического передела зубчатых колес из сталей: а – 20Х2Н4А; б – 21ХГНМБА

Сравнительные стендовые испытания показали, что долговечность опытных зубчатых колес, обеспечиваемая сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев, составляет:

- для зубчатых колес из стали 20Х2Н4А – от 300 до 400 ч (рис. 2, а);
- для зубчатых колес из стали 21ХГНМБА – 700 ч без каких-либо повреждений зубьев (рис. 2, б).

На основании результатов исследований [7] сделан вывод, что экономнолегированные стали могут быть успешно применены для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин. Установлены основные преимущества новой экономнолегированной стали:

- 1) сокращается время технологических процессов предварительной термической и химико-термической обработок, так как исключается операция высокого отпуска;
- 2) твердость поверхности не ниже 60 HRC обеспечивается при содержании углерода 0,6%;

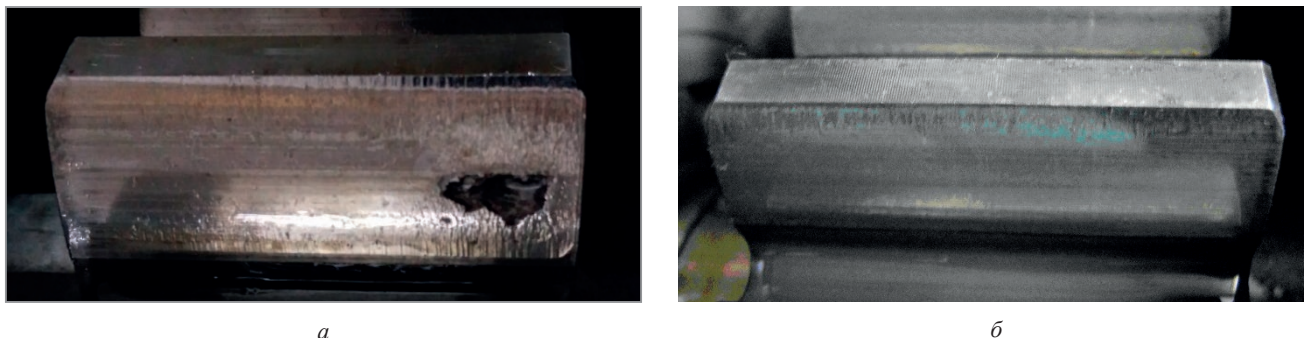


Рис. 2. Состояние поверхностей зубьев после стендовых испытаний зубчатых колес из сталей:
a – 20X2H4A; *б* – 21XГНМБА

3) имеется возможность повышения температуры цементации до 960 °С без ухудшения качественных структурных показателей химико-термической обработки;

4) небольшое содержание никеля (до 1 %) способствует снижению остаточного аустенита в диффузионных слоях при химико-термической обработке;

5) высокая прокаливаемость и рациональный комплекс механических свойств обеспечивают ее применение для крупномодульных зубчатых колес.

Целью работы являлась опытно-промышленная проверка качества изготовления зубчатых колес из экономнолегированной стали на всех этапах технологического передела в условиях серийного производства.

Опытно-промышленную проверку качества изготовления проводили для зубчатых колес редукторов мотор-колес карьерных самосвалов из проката новой конструкционной экономнолегированной стали 21XГНМБА (табл. 1), который был получен от ЧАО «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ».

Одним из основных вопросов технологического передела является **предварительная термическая обработка** (ПТО) заготовок, которая проводится для формирования структуры, улучшающей обрабатываемость резанием, а также для стабилизации и уменьшения деформаций в процессе химико-термической обработки (ХТО). Выбор режимных параметров ПТО заготовок из экономнолегированной стали осуществляли с учетом химического состава стали на основании сведений о кинетике превращения переохлажденного аустенита [8, 9].

Для хромоникелевых сталей с повышенным содержанием никеля, обладающих высокой устойчивостью аустенита в перлитной и промежуточной областях, применяют комбинированный процесс ПТО. Так, серийный технологический процесс ПТО поковок из сталей 20X2H4A, 20XH3MA, проводимый на ОАО «БЕЛАЗ» в шахтных печах, характеризуется следующим режимом: нагрев до 900–920 °С, выдержка в течение 4–5 ч, охлаждение с печью до температуры 600 °С, выдержка в течение 4 ч, охлаждение с открытой крышкой до температуры 200 °С, охлаждение на воздухе до комнатной температуры. Затем проводится высокий отпуск с выдержкой в течение 4 ч при температуре 680 °С, охлаждение с печью до температуры 200 °С, далее охлаждение на воздухе до комнатной температуры. Общее время серийной ПТО составляет не менее 170 ч с охлаждением до комнатной температуры. После такого режима ПТО микроструктура поковок из серийных сталей 20X2H4A, 20XH3MA представляет собой сорбитообразный перлит и феррит с твердостью не более 229 НВ.

Экономнолегированные стали, имеющие низкое содержание никеля, характеризуются пониженной устойчивостью аустенита в промежуточной области. Режим ПТО таких сталей характеризуется отсутствием операции высокого отпуска [10]. На выбор режима ПТО экономнолегированных сталей основное влияние оказывают добавки молибдена и других карбидообразующих легирующих элементов. Экономнолегированная сталь 21XГНМБА, разработанная для зубчатых колес трансмиссий автосамосвалов БЕЛАЗ (табл. 1), отличается повышенным содержанием молибдена до 0,50 %. Легирование молибденом приводит к значительному повышению устойчивости аустенита в перлитной области [8, 9]. Начало образования феррита смещается от 1,5 с (сталь без молибдена) к 15 с (сталь с молибденом), а начало перлитного превращения соответственно смещается от 50 с к 2000 с [8]. Легирование молибденом также приводит к существенному расширению средней области (бейнитное превращение). В стали без молибдена промежуточное превращение заканчивается через 20 с, а в стали с молибденом – через 400 с. В связи с изменением кинетики превращений аустенита в стали с молибденом в широком интервале скоростей охлаждения получается бейнитная структура.

С учетом указанных особенностей для разработки технологического режима ПТО поковок на образцах из новой стали 21ХГНМБА были исследованы пять схем технологического процесса ПТО:

1. Высокий отпуск при 620 °С с выдержкой 3 ч.
2. Нормализация – нагрев до 900 °С, выдержка 1,5 ч, охлаждение на воздухе.
3. Нормализация по п. 2 с последующим высоким отпуском: нагрев до 620 °С, выдержка 3 ч, охлаждение до 20 °С.
4. Изотермический отжиг в шахтной печи: нагрев до 900 °С, выдержка 4,5 ч, охлаждение с печью до температуры 600 °С, выдержка в течение 4 ч, охлаждение с открытой крышкой до температуры 200 °С, охлаждение на воздухе до комнатной температуры, нагрев до 680 °С, выдержка 4 ч, охлаждение с печью до 200 °С, охлаждение на воздухе.
5. Полный отжиг – нагрев до 900 °С, выдержка 1,5 ч, охлаждение с регламентированной скоростью.

В табл. 2 приведены результаты испытаний на твердость кованных образцов из стали 21ХГНМБА после разных вариантов ПТО, а также исследований микроструктуры. Микроструктура образцов после разных вариантов ПТО приведена на рис. 3.

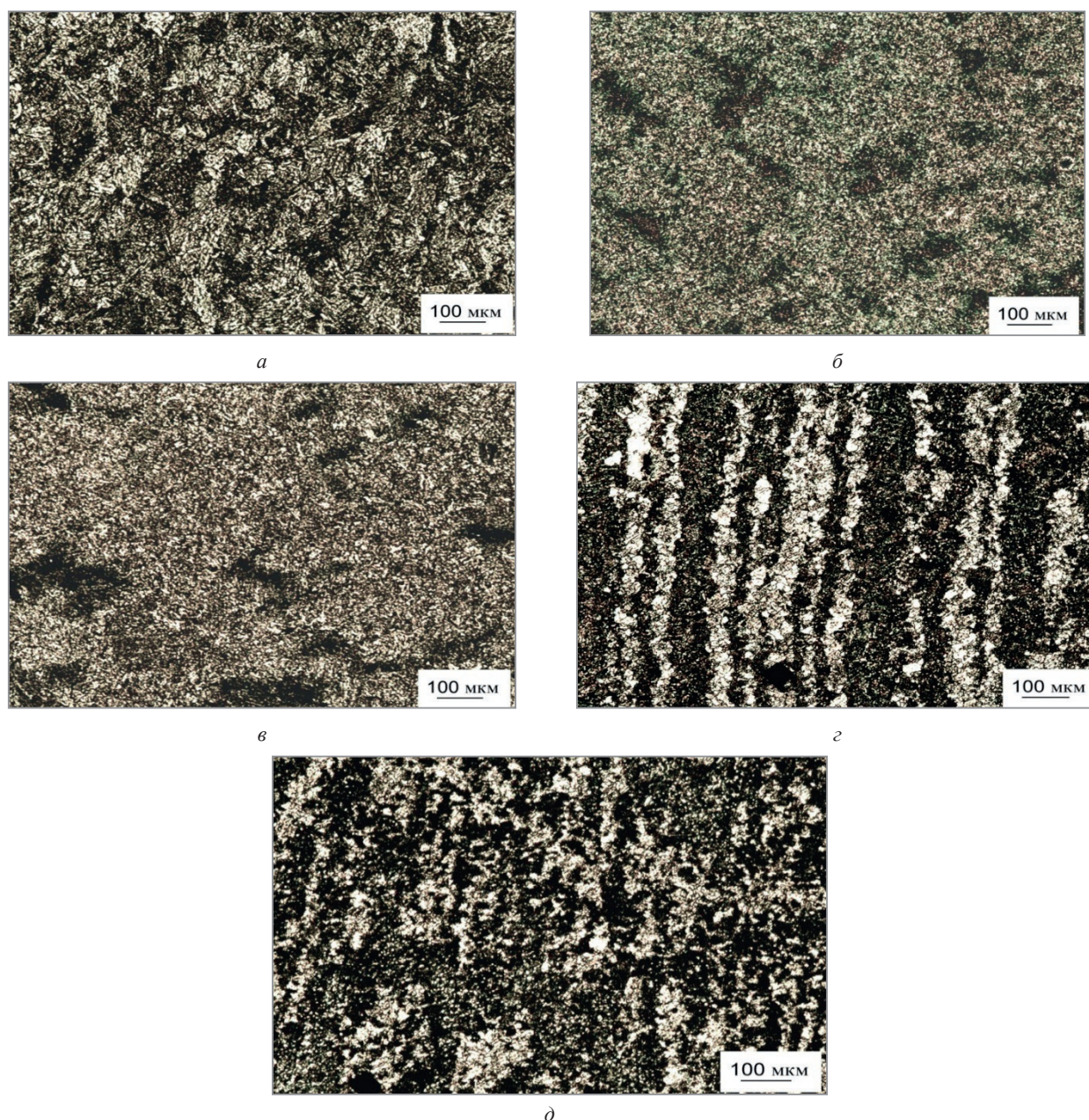


Рис. 3. Микроструктура образцов после разных вариантов ПТО, травление в 4%-ном растворе азотной кислоты:
а – высокий отпуск; *б* – нормализация; *в* – нормализация+высокий отпуск;
г – изотермический отжиг; *д* – полный отжиг с регламентированной скоростью охлаждения

Таблица 2. Результаты испытаний на твердость образцов из стали 21ХГНМБА после разных вариантов ПТО

Номер схемы	Вид ПТО	Твердость НВ			Микроструктура
		минимальная	максимальная	средняя	
1	Высокий отпуск	273	293	282	Феррит + сорбит
2	Нормализация	270	330	295	Сорбит + бейнит
3	Нормализация + высокий отпуск	227	253	238	Феррит + перлит
4	Изотермический отжиг	190	280	229	Феррит + перлит полосчатость
5	Полный отжиг	185	285	221	Феррит + перлит

На основании полученных результатов исследований в качестве предварительной термической обработки заготовок из стали 21ХГНМБА рекомендован полный отжиг с регламентированной скоростью охлаждения (рис. 4). Данный режим ПТО обеспечивает приемлемую твердость поковок и допустимую микроструктуру с минимальной полосчатостью.

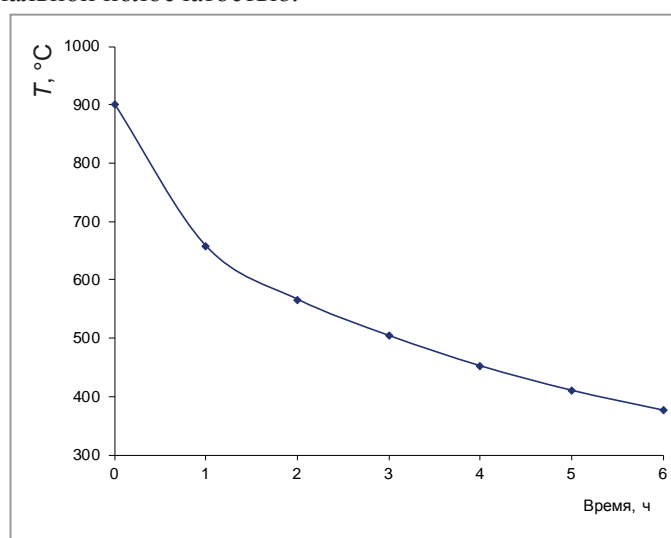


Рис. 4. Рекомендуемые скорости охлаждения заготовок из стали 21ХГНМБА при полном отжиге

Предложенный режим ПТО реализован в условиях производства со следующим режимом работы шахтной печи: нагрев до 900 °С; выдержка 3,0 ч; охлаждение с печью с открытой крышкой до 200 °С, далее – охлаждение на воздухе.

Испытания образцов и заготовок из стали 21ХГНМБА после ПТО по разработанному режиму показали, что твердость материала кованых заготовок колебалась в пределах от 142 до 197 НВ, микроструктура после ПТО – дифференцированная, состоит из полиэдрического феррита и перлита и является наиболее оптимальной для обеспечения механической обрабатываемости заготовок из стали 21ХГНМБА. Общее время разработанной ПТО составляет 50–70 ч в зависимости от массы садки.

Разработанный режим ПТО заготовок из экономнолегированной стали 21ХГНМБА обеспечивает снижение времени (не менее чем в 2 раза) по сравнению с серийной ПТО (изотермическим отжигом), применяемой для заготовок из серийных хромоникелевых сталей.

Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономнолегированной стали является ответственным этапом, определяющим твердость и структуру поверхностно-упрочненных слоев зубчатых колес, а также продолжительность процесса обработки и его энергозатратность. Технологические режимы химико-термической обработки должны регламентировать величину твердости и ее распределение по упрочненному слою (эффективную толщину), задаваемую для обеспечения эксплуатационного ресурса зубчатых колес. Регламентированное распределение твердости (микротвердости) по толщине слоя поверхностно-упрочненных зубчатых колес определяли на основании технических требований, указанных в рабочей документации на зубчатые колеса из экономнолегированной стали 21ХГНМБА, с учетом припуска под финишную обработку поверхностей зубьев.

Возможность получения регламентированного распределения твердости по толщине диффузионного слоя зависит от распределения углерода в слое, прокаливаемости стали, а также интенсивности

охлаждения при закалке, которая связана как с характеристиками закалочного оборудования, так и с размерами и формой деталей. Прокаливаемость экономнолегированной стали 21ХГНМБА исследовали методом торцевой закалки для сердцевины и цементованного слоя (рис. 5). Пунктирными линиями на рис. 5, б показана прокаливаемость цементованного слоя после торцевой закалки и низкого отпуска в зависимости от содержания углерода.

Прокаливаемость зубьев зубчатых колес определяли на основе экспериментальной зависимости между расстоянием от охлаждаемого торца закаленного торцевого образца и по сечению зуба закаленного зубчатого колеса при условии равенства в контролируемых зонах скоростей охлаждения при одинаковом их химическом составе [11]. Получено, что для зубчатых колес с модулем 8 мм твердость сердцевины зубьев соответствует твердости торцевого образца на расстоянии от охлаждаемого торца 17–24 мм, а для зубчатых колес с модулем 12 мм – на расстоянии от торца 30–40 мм. Соответственно этим расстояниям на основании данных по прокаливаемости сердцевины установили, что твердость сердцевины зубьев зубчатых колес с модулем 8 мм будет составлять 38–34 HRC, а с модулем 12 мм – 34 HRC.

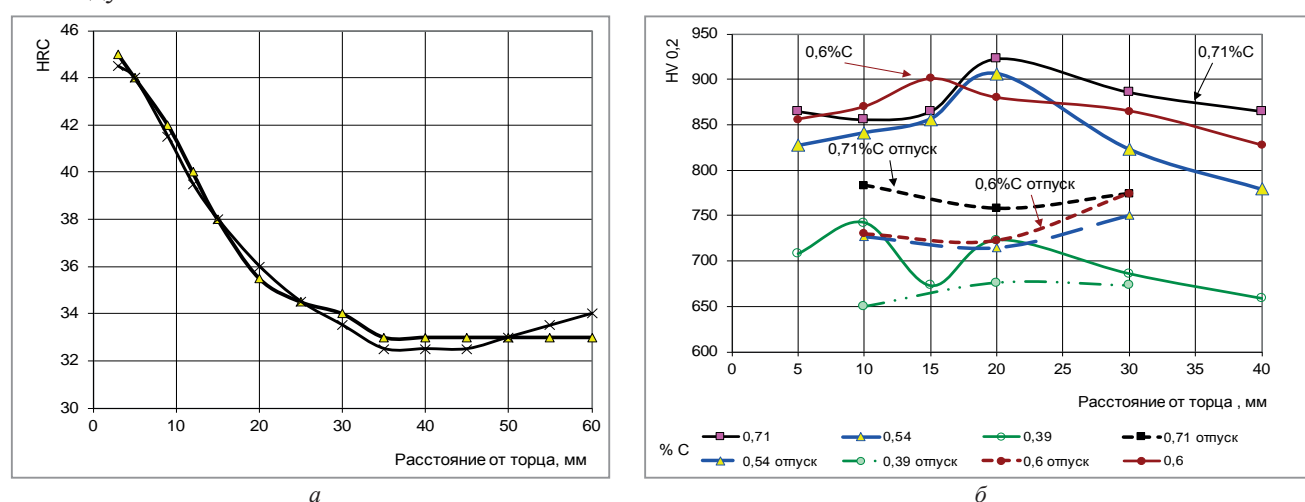


Рис. 5. Прокаливаемость стали 21ХГНМБА:
а – прокаливаемость сердцевины; б – прокаливаемость цементованного слоя

Твердость поверхности цементованного слоя и на расстоянии от нее 1 мм для зубчатых колес с модулем 8–12 мм примерно одинаковая и соответствует твердости торцевого образца на расстоянии от охлаждаемого торца 6–9 мм. По данным рис. 5, микротвердость цементованного слоя после закалки составляет 880–920 HV_{0.2}, а после последующего низкого отпуска – 750–800 HV_{0.2} при содержании углерода 0,6–0,7%.

Разработку температурно-временного режима цементации зубчатых колес из экономнолегированной стали 21ХГНМБА проводили на основе математического моделирования процесса диффузии углерода в стали по программе DCarb [3]. Модель основана на известном уравнении массопереноса углерода из насыщающей атмосферы в сталь с учетом конструктивных особенностей 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, температуры, выдержки и т. п.).

При разработке режима цементации необходимым условием является достижение содержания углерода 0,35 %C в диффузионном слое зубчатых колес из экономнолегированной стали 21ХГНМБА, которому соответствует микротвердость слоя 550 HV_{0.2} после закалки и низкого отпуска, обеспечивающая регламентированную эффективную толщину до полупереходной зоны. Достаточным условием является достижение после ХТО эффективной толщины диффузионного слоя до зон с микротвердостью 750 HV_{0.2} и 700 HV_{0.2}, регламентируемой технической документацией для обеспечения заданного ресурса зубчатых колес. Содержание углерода, требуемое для формирования после ХТО эффективной толщины до зон слоя с микротвердостью 750 HV_{0.2} и 700 HV_{0.2}, определяли на основании результатов экспериментальных исследований прокаливаемости цементованного слоя (рис. 5). Результаты исследований показывают, что для экономнолегированной стали 21ХГНМБА максимальное содержание углерода в диффузионном слое, обеспечивающее указанное выше условие, не должно превышать 0,75 % C.

Режимы цементации зубчатых колес из экономнолегированной стали 21ХГНМБА разрабатывали с учетом их модуля для разных программ цементации на печах Ипсен (табл. 3). После цементации выполняется закалка после повторного нагрева с температуры 840–850 °С и последующий низкий отпуск при температуре 170 °С.

Таблица 3. Разработанные режимы цементации зубчатых колес с модулем 7–12 мм из экономнолегированной стали 21ХГНМБА

Номер стадии	Температура, °С	% С	Номер программы			
			2	3	4	5
			время насыщения, мин			
1	930	0,4	60	60	60	60
2	930	1,2	360	400	600	720
3	930	1,2	476	720	780	1080
4	930	0,8	180	180	180	216
Общее время, мин			1076	1360	1620	2176
Толщина слоя до 0,35 %С			2,1	2,4	2,6	3,0

Отличительными особенностями разработанной технологии ХТО по сравнению с серийной являются перераспределение времени активной стадии цементации с ее уменьшением и дифференциального выравнивания в сторону увеличения при сохранении общего времени процесса цементации; исключение операции высокого отпуска.

В процессе исследований установлено, что при проведении ХТО особое внимание должно уделяться регулированию углеродного потенциала на уровне 0,8%С с точностью $\pm 0,05\%$ С на стадиях диффузионного выравнивания и закалки, что является одним из условий исключения дефектов в поверхностных слоях цементованного слоя в виде продуктов немартенситного превращения (бейнита, троостита), снижающих сопротивление глубинной контактной усталости. Снижение углеродного потенциала при нагреве под закалку до уровня 0,2–0,4%С может привести к появлению остаточных растягивающих напряжений в упрочненном слое, которые повышают вероятность шлифовочных дефектов при последующей финишной обработке.

Процессам шлифования как завершающим этапам технологического передела должно уделяться особое внимание, так как они обеспечивают повышенные требования к точности и качеству обрабатываемых деталей. Шлифование характеризуется высокой скоростью резания, тепловыделением в зоне обработки и большим силовым воздействием на заготовку. Основное влияние на качество обрабатываемых поверхностей при шлифовании оказывают свойства шлифовального круга. К числу основных относят нестабильность механических свойств абразивного материала; большое разнообразие форм и размеров абразивных зерен одной зернистости; неоднородное распределение абразивных зерен на рабочей поверхности круга со случайной ориентацией относительно обрабатываемой поверхности; разброс свойств связки зерен; случайный характер свойств размеров пор и их распределение в объеме круга и др. Отмеченные свойства составляющих элементов шлифовального круга определяют стохастический процесс съема материала при шлифовании и неоднородный температурно-силовой режим в микрообъемах зоны шлифования. Кроме того, на процесс шлифования накладываются случайные факторы, обусловленные нестабильностью физических свойств обрабатываемого материала, припуска под шлифование, а также динамических характеристик технологического оборудования. Поэтому выбор абразивного инструмента должен учитывать химические и физико-механические свойства обрабатываемого материала, режимы обработки, техническое состояние станка, мощность его привода и др. Так, при обработке материалов с высокой твердостью абразивные зерна шлифовальных кругов интенсивнее истираются и затупляются. Удаление затупившихся зерен скорее происходит в сравнительно мягких кругах. Поэтому для обработки твердых материалов применяются более мягкие абразивные инструменты, а для обработки материалов невысокой твердости – более твердые.

Выводы

Приведены результаты опытно-промышленной проверки технологических процессов изготовления опытных партий зубчатых колес из новой экономнолегированной стали 21ХГНМБА в условиях серийного производства. В качестве предварительной термической обработки заготовок из стали 21ХГНМБА рекомендован полный отжиг с регламентированной скоростью охлаждения, обеспечивающий

дифференцированную микроструктуру, состоящую из полиэдрического феррита и перлита, твердость до 229 НВ. Разработаны режимные параметры ХТО зубчатых колес с модулями 7–12 мм из экономнолегированной стали 21ХГНМБА. Показана высокая эффективность технологических режимов ПТО заготовок и ХТО зубчатых колес из экономнолегированной стали 21ХГНМБА. Даны рекомендации по выбору абразивного инструмента для шлифования высокопрочного материала. Применение экономнолегированной стали позволяет сократить длительность предварительной и химико-термической обработок, исключив операцию высокого отпуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, С.П. Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Сталь. 2018. № 8. С. 54–58.
2. Анализ применения комплексно-легированных сталей для зубчатых колес карьерных самосвалов / С.П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов, материалов. 2018. № 2 (43). С. 55–60.
3. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. Минск: Беларуская навука, 2014. 126 с.
4. Руденко, С.П. Оценка применимости экономнолегированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Вып. 7. Минск: ОИМ НАН Беларуси. 2018. С. 346–349.
5. Опыт-промышленная проверка качества изготовления зубчатых колес из экономнолегированной стали в производственных условиях / П.И. Папковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Вып. 10. Минск: ОИМ НАН Беларуси. 2021. С. 150–155.
6. Руденко, С.П. Сопротивление 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. С. 68–73.
7. Руденко, С.П. Применение перспективных экономнолегированных марок сталей для зубчатых колес мобильных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 4. С. 61–69.
8. Энтин, Р.И. Превращения аустенита в стали / Р.И. Энтин. М.: Металлургиздат, 1960. 253 с.
9. Попов, А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А.А. Попов, Л.Е. Попова. М.: Металлургия, 1965. 497 с.
10. Сагарадзе, В.С. Повышение надежности цементуемых деталей / В.С. Сагарадзе. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
11. Руденко, С.П. Перспективы применения цементуемых сталей, изготавливаемых по европейскому стандарту, для зубчатых колес отечественных мобильных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 147–152.

REFERENCES

1. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Osobennosti primeneniya ekonomnolegirovannykh staley dlya krupnomodul'nykh zubchatykh koles [Feature of application of the economical steel alloy for largely modular gear wheels]. *Stal' = Steel*, 2018, no. 8, pp. 54–58.
2. Rudenko S.P. Analiz primeneniya kompleksno-legirovannykh staley dlya zubchatykh koles kar'er-nykh samosvalov [Analysis of the use of complex-alloyed steels for gear wheels of mining dump trucks]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov, materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 2, pp. 55–60.
3. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Kontaktnaya ustalost' zubchatykh koles transmissij energonasyshchennykh mashin [Contact fatigue of gears of transmission of high-power machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, 126 p.
4. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirskij S.G. Ocenka primenimosti ekonomnolegirovannykh staley dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh koles [Evaluation of the applicability of economically alloyed steels for high-stress gears]. *Sbornik nauchnykh trudov = Collection of scientific papers*. Minsk, OIM NAN Belarusi Publ., 2018, vyp. 7, pp. 346–349.
5. Papkovskij P.I. Opytno-promyshlennaya proverka kachestva izgotovleniya zubchatykh koles iz ekonomnolegirovannoj stali v proizvodstvennykh usloviyah [Test output quality control of the production of gears made of sparingly alloyed steel in production conditions]. *Sbornik nauchnykh trudov = Collection of scientific papers*. Minsk, OIM NAN Belarusi Publ., 2021, vyp. 10, pp. 150–155.
6. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G. Soprotivlenie kontaktnoj ustalosti krupnomodul'nykh zubchatykh koles iz hromonikelevykh staley [Resistance to contact fatigue of coarse-modular gears made of chromium-nickel steels]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 1, pp. 68–73.
7. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirskij S.G. Primenenie perspektivnykh ekonomnolegirovannykh marok staley dlya zubchatykh koles mobil'nykh mashin [Application of promising economically alloyed steel grades for gear wheels of mobile machines]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4, pp. 61–69.
8. Entin R.I. *Prevrashcheniya austenita v stali* [Transformations of austenite into steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1960, 253 p.
9. Popov A.A., Popova L.E. *Izotermicheskie i termokinetichekije diagrammy raspada pereohlazhdennogo austenita* [Isothermal and thermokinetic diagrams of supercooled austenite decay]. Moscow, Metallurgija Publ., 1965, 497 p.
10. Sagaradze V.S. *Povyshenie nadezhnosti cementuemykh detalej* [Improving the reliability of cemented parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 216 p.
11. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirskij S.G. Perspektivy primeneniya cementiruemykh staley, izgotovlyaemykh po evropejskomu standartu, dlya zubchatykh koles otechestvennykh mobil'nykh mashin [The perspective of application of carburized steels, manufactured according to the European standard, for gears of domestic mobile machines]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 147–152.