

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

Асташенко В.И., Соловейчик С.С., Асташенко Т.В., Сосновский А.П.
(ГОУ ВПО «Камская государственная инженерно-экономическая академия»,
г. Набережные Челны, Российская Федерация)

Complex researches of mechanical and technological properties of steels AC40H2NMAF and AC30H3NMAFB are carried out. Advantages of new steels and a part of increase static and dynamic characteristics are shown. Use of such steels for manufacturing of hard loaded details-cranked of shaft and engine rods is recommended. Efficiency of application of a steel 18HGR for cogwheels is shown.

Введение

В связи с ускоренным развитием техники крайне актуальными встают вопросы повышения надежности и долговечности деталей машин. Особенно возрастает роль такой задачи в настоящее время, так как развитие основных отраслей промышленности идет в направлении повышения нагрузок, температур и использования агрессивных сред, в которых работает деталь. Возможным решением поставленной задачи является разработка, исследование и внедрение новых высокопрочных сталей.

Цель работы. Исследование свойств сталей АЦ40Х2НМАФ, АЦ30Х3НМАФБ и 18ХГР и их опытно-промышленное апробирование при изготовлении тяжелонагруженных деталей автомобиля «КАМАЗ».

Методика работы

Металлографические исследования выполнены с использованием микроскопов «Эпитип-2» и «Неофот-2» при увеличениях $\times 100$ - $\times 1000^*$. Загрязненность стали неметаллическими включениями оценивали по ГОСТ 1778-70, размер зерна определяли методом окисления (стали АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ) и методом цементации (сталь 18ХГР) по ГОСТ 5639-82.

Испытания на растяжения и ударную вязкость проводили на разрывной машине ZD-20 и маятниковом копре PSW-30 в соответствии с ГОСТ 1497-61 и ГОСТ 9454-60. Образцы изготавливали из заготовок, отобранных из проката по ГОСТ 7564-73 и прошедших термическую обработку: для сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ - закалка с температуры 930°C в масло и отпуск при 630°C; для стали 18ХГР – закалка с 860°C в воду и отпуск при 200°C с охлаждением на воздухе. Для определения твердости применяли приборы ТШ-2М и ТК-2М, а микротвердости – прибор «Дуримет». Усталостная прочность на изгиб коленчатых валов оценивалась путем нагружения щеки переменным изгибающим моментом, а на кручение – путем нагружения шатунной шейки переменным крутящим моментом. Испытания шатунов проводили по знакопеременному циклу нагружения с воспроизведением гидродинамики в подшипнике скольжения кривошипной головки при растягивающем напряжении от 4 до 8 тн и двойной амплитуде цикла от 14 до 24 тн. Обрабатываемость резанием оценивалась в лабораторных и производственных условиях на автоматических линиях при механической обработке заготовок коленчатого вала, шатунов и зубчатых колес двигателя и мостов автомобиля.

Результаты исследования

В таблице 1 представлено содержание химических элементов в стали АЦ40Х2НМАФ, выплавленной в мартеновской печи, обработанной синтетическим шлаком и прокатанной на квадрат 154±2 мм на Серовском металлургическом заводе; и в стали АЦ30Х3НМАФБ, выплавленной и прокатанной на круг 70мм в ПО «Ижсталь». Эти марки стали упрочнены за счет легирования азотом, ванадием и ниобием.

Таблица 1. Химический состав сталей

Сталь	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	V	P	S	Nb
АЦ40Х2НМАФ	0,37	0,20	2,12	0,72	0,45	0,11	0,11	0,025	0,007	-
АЦ30Х3НМАФБ	0,31	0,24	2,54	0,74	0,40	0,20	0,07	0,021	0,011	0,03

В состоянии поставки загрязненность стали АЦ40Х2НМАФ оксидами и сульфидами не превышала 2,5 балла, а стали АЦ30Х3НМАФБ – оксидами не более 3 балла, сульфидами – 2 балла и нитридами – 1 балла. Механические свойства термически обработанной стали находятся на высоком уровне и выше, нежели чем у серийно используемых сталей 42ХМФА и 40ХН2МА для коленчатых валов и шатунов двигателя (табл. 2).

Таблица 2. Механические свойства сталей

Сталь	Показатели свойств					
	σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ
АЦ30Х3НМАФБ шатуны	1210 (1000)	1080 (850)	12,5 (12)	56 (55)	110 (100)	334 (287)
АЦ40Х2НМАФ коленчатый вал	1110 (850)	1030 (730)	12,5 (12)	54,0 (42)	88 (80)	321 (255)

Примечание. В скобках указаны минимальные значения свойств в состоянии поставки для стали 40ХН2МА (шатуны) по ГОСТ 4543-71 и для стали 42ХМФА (коленчатый вал) по ТУ 14-1-5520-2005.

В процессе изготовления поковок, предусматривающего индукционный нагрев заготовок до температуры 1260±20°С, пластическую деформацию и термическую обработку, установлена технологичность сталей с нитридванадиевым упрочнением на данных стадиях обработки. Оптимальный уровень прочностных и пластических свойств сталей получен в результате термической обработки поковок, включающей аустенизацию при температуре 930±20°С, закалку в масло и отпуск при 630±20°С с последующим охлаждением в масло. Более высокая температура (930°С) нагрева сталей под закалку по отношению к сталям 42ХМФА и 40ХН2МА (860°С) объясняется механизмом нитридванадиевого упрочнения. Однако, такое повышение температуры может привести к уменьшению межремонтных периодов термических агрегатов и снижению стойкости жаропрочных материалов.

Механическая обработка заготовок шатуна в количестве 1000 штук на автоматической линии показала высокую технологичность стали АЦ30Х3НМАФБ на различных операциях резания. Твердость заготовок находилась в пределах 255-302 НВ, а микроструктура соответствовала сорбиту отпуска (табл.3).

Анализ обрабатываемости заготовок коленчатого вала показал, что основной лимитирующей стадией процесса резания являются операции глубокого сверления, характеризующиеся показателем $L/D > 3$ (L- длина отверстия, D- диаметр сверла). Затруднение при механической обработке выразилось в налипании материала заготовок на режущий инструмент и образованием плохо удаляемой стружки из зоны резания, что служило причиной поломки сверл Ø5,5 ? 10,0 мм. Учитывая взаимосвязь обрабатываемости резанием со свойствами материала, параметрами режима резания и конструктивных особенностей инструмента, исследована возможность улучшения обрабатываемости на операциях сверления заготовок из комплексно легированной

термоулучшаемой стали АЦ40Х2НМАФ. Установлено, что оптимальными параметрами при сверлении заготовок из новой стали являются:

- Для сверл ϕ 5,5 мм и ϕ 5,7 мм – подача 0,1 мм/об при скорости 660 об/мин
- Для сверл ϕ 8,5 мм и ϕ 8,7 мм – подача 0,17 мм/об при скорости 400 об/мин
- Для сверл ϕ 9,0 мм и ϕ 10,0 мм – подача 0,15 мм/об при скорости 360 об/мин

Основное внимание при опытно-промышленном апробировании уделено показателям служебных свойств деталей – их усталостной прочности. Стендовые испытания деталей из опытной стали показали, что пределы выносливости коленчатых валов составляют: на изгиб – 1000 кг·м, на кручение – 900 кг·м, что превышает эти показатели свойств для применяемой в настоящее время стали 42ХМФА (900 и 800 кг·м соответственно).

Интерес представляют результаты усталостных испытаний шатунов, что объясняется дополнительной разработкой новой технологии термической обработки стали АЦ30Х3НМАФБ, структура и твердость деталей указаны в таблице 3.

Таблица 3. Свойства стали АЦ30Х3НМАФБ после термической обработки

Режим термообработки				Структура	Твердость, НВ
$T_{\text{ауст}}^{\circ}\text{C}$	Охлаждающая среда	$T_{\text{отп}}^{\circ}\text{C}$	Охлаждающая среда		
940	Воздух	650	Воздух	Сорбит	285
930	Масло	650	Масло	Сорбит	302
930	Воздух	705	Масло	Сорбит	278
950 (температура окончания штамповки)	Воздух (2-5°C/сек) на конвейере	705	Воздух	Сорбит + Феррит	255

Видно, что во всех случаях в стали формируется сорбитная структура. Незначительное снижение твердости наблюдается у деталей, термическая обработка которых включала реализацию ковочного тепла заготовок. Результаты стендовых испытаний деталей показали, что предел усталости всех опытно-промышленных деталей составил на сжатие 6 тн при двойной амплитуде цикла 24 тн, что на 50% превышает аналогичные показатели деталей, изготовленных из стали 40ХН2МА. Следует также отметить, что наличие дробенаклепа поверхности деталей дополнительно повышает выносливость шатунов, что подтверждено металлографическими исследованиями, изучением микротвердости поверхности и усталостными испытаниями.

Особое значение приобретают вопросы выбора сталей для зубчатых колес. Шестерни ведущих мостов грузовых автомобилей испытывают в эксплуатации целый спектр изменяющихся статических и динамических нагрузок. Широко применяемые стали, такие как 20ХГНМТА, 25ХГТ и другие [1], приводят к преждевременному выходу из строя деталей из-за поломки зубьев. Одной из причин низкой стойкости шестерен послужила высокая твердость в сердцевине детали, оцениваемая согласно нормативным документам на расстоянии 2/3 от вершины зуба по его осевой линии.

В подтверждение вышесказанному убедительно свидетельствуют и результаты стендовых испытаний деталей с различной твердостью в сердцевине зуба шестерни (табл.4).

Таблица 4. Влияние твердости сердцевины зуба шестерни на стойкость при стендовых испытаниях (сталь 20ХГНМТА)

№ п/п	Прокаливаемость $\Pi \frac{HRC}{9}$	Твердость, HRC		Глубина* цементованного слоя	Стойкость детали, час
		поверхности	сердцевины		
1	43,5	61,5	44,0	1,20	2,55
2	39,0	61,5-62,0	36,0	1,15	4,10

Примечание: * Глубина цементованного слоя определена во впадине зуба – наиболее опасном сечении.

Ключевое влияние на этот показатель свойств, безусловно, оказывает прокаливаемость стали. Очевидно, чем выше прокаливаемость и меньше геометрические параметры изделия, тем выше твердость в сердцевине детали. Установлено, что твердость в сердцевине зуба шестерен с модулем 5 мм после ХТО на 8-10 HRC выше, чем твердость определенная на рекомендуемом расстоянии 9 мм от охлаждаемого торца стандартного образца по ГОСТ 5657-69 (рис.1). Только на шестернях с модулем более 8,0 мм достигается аналогичная величина твердости, что и прокаливаемость стали на указанном расстоянии от торца образца [2].

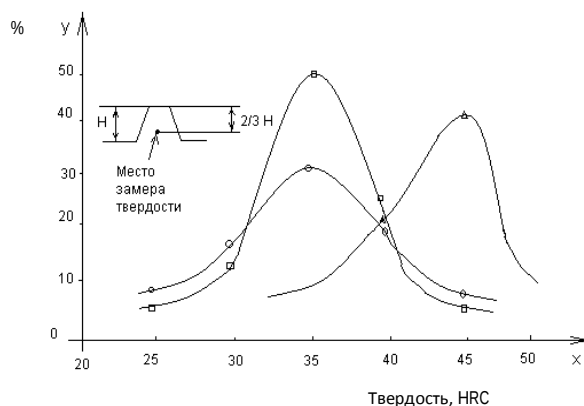


Рис. 1. Частота (%) распределения твердости сердцевины зуба шестерен с различным модулем после ХТО. Сталь 20ХГНМТА. Количество партий деталей – 85 шт:

○ – исходное состояние стали ($\Pi \frac{HRC}{9}$); Δ – модуль $m=5$ мм; □ – модуль $m=8.7$ мм

Данные результаты свидетельствуют о необходимости регламентирования прокаливаемости стали на различном расстоянии от охлаждаемого торца образца с учетом масштабного фактора детали. Для шестерен первоочередным условием является модуль зуба.

В настоящее время успешно проходит испытание экономолегирующая сталь марки 18ХГР, для мелко- и крупномодульных шестерен коробки передач и главных мостов автомобиля «КАМАЗ». К новой стали предъявляются требования по химсоставу и прокаливаемости (табл.5,6). Как показали исследования, механические свойства стали превышают значения предусмотренные для стали 20ХГНМТА (табл.7), которые достигаются за счет одновременного модифицирования сплава бором и алюминием. Опытная сталь выплавлена на Оскольском электро-металлургическом комбинате и

прокатана на 090 мм из непрерывно-литой заготовки сечением 360?300 мм (степень деформации составила более 6,0).

Таблица 5. Химический состав сталей

Сталь	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti (B)	Al	S	P
20ХГНМТА	0,18-0,23	0,17-0,37	0,8 – 1,10	0,8-1,1	0,8-1,1	0,2-0,3	0,03-0,09	-	≤ 0,025	≤ 0,025
18ХГР*	0,14-0,20	0,15-0,40	1,10-1,35	1,1-1,35	0,15-0,30	0,04-0,12	0,002 (0,001-0,003)	0,02-0,05	0,020-0,035	≤ 0,025

Примечание: *Суммарное содержание Mn, Cr, Ni и Mo должно быть от 2,5 до 3,05%.

Таблица 6. Прокаливаемость сталей

Сталь	Твердость (HRC) на расстоянии от закаленного торца, мм							НТД
	5	9	10	15	25	40	50	
20ХГНМТА	-	30-40	-	24-38	-	≤ 25	-	ТУ 14-1-5509-2005
18ХГР	37-43	-	33-39	-	25-31	-	≥ 22	ТУ 14-1-5561-2008

Таблица 7. Механические свойства сталей

Сталь	σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²	НВ
20ХГНМТА	≥1300	≥ 1100	≥ 11	≥ 50	≥ 78	-
18ХГР *	1485	1350	13,5	59	94,5	363

Примечание:* Химический состав плавки: C-0,18%; Si-0,28%; Mn -1,21%; Cr -1,22%; Ni – 0,26%; Mo – 0,09%; B -0,002%; S – 0,029% и P – 0,018%.

Для обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием заготовок на автоматических линиях они после горячей объемной штамповки подвергались изотермическому отжигу (рис. 2). После термической обработки в стальных заготовках стабильно формируется феррито-перлитная структура, а величина твердости находится в пределах 163-197 НВ. Обязательным условием при выборе параметров отжига является необходимость ускоренно-прерывистого циклического охлаждения заготовок с температуры аустенитизации до температуры максимальной скорости перлитного превращения [3] и проведение изотермической выдержки со ступенчатым понижением температуры от 680 до 600°C [4].

Важным условием для сталей подвергаемым горячим видам обработки является размер аустенитного зерна, который влияет на усталостную прочность деталей. Известно, что при крупнозернистом строении усталостная прочность на изгиб в ножке зуба снижается на 25%, а на кручение – на 40%. Для стали 18ХГР температурная зависимость показала, что порог роста зерна в ней находится при температуре 940°C и выше. Данная информация свидетельствует об ограничении температуры аустенитизации при отжиге заготовок и температуры насыщения деталей при цементации в процессе химико-термической обработки.

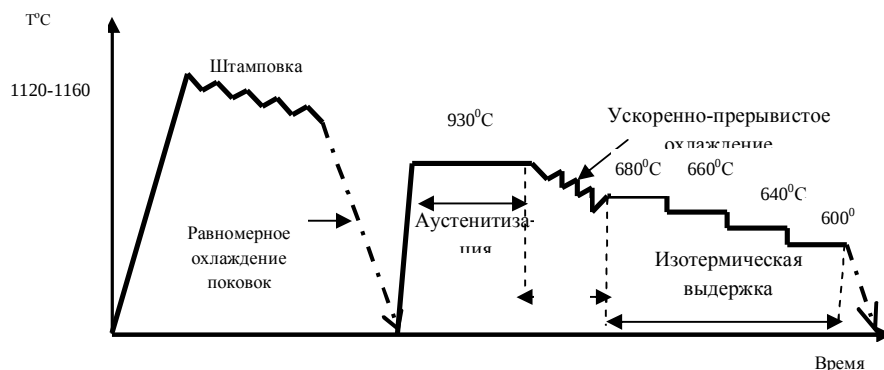


Рис. 2. Схема унифицированной технологии при производстве заготовок из цементуемых легированных сталей

Высокие показатели свойств достигнуты на цементованных шестернях: твердость поверхности 59-62 HRC; эффективная глубина насыщения (до 610HV) составила 0,7-0,8 мм; количество остаточного аустенита в упрочненном слое не превышало 25%; содержание углерода на расстоянии 0,1 мм от поверхности составляло 0,7-0,85%; твердость в сердцевине – 37-38 HRC; величина зерна – 7-8 балл.

Выводы

1. Высокие показатели механических свойств сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ, полученные при статических и динамических испытаниях, позволяют рекомендовать их для изготовления тяжело нагруженных деталей – коленчатых валов и шатунов автомобиля.
2. Экономнолегированная цементуемая сталь 18ХГР показала высокую технологичность, обладает необходимым уровнем механических свойств и с успехом может применяться для шестерен автомобилей.
3. Учитывая затруднения по обрабатываемости (глубокому сверлению заготовок) и необходимость повышения температуры аустенизации сталей АЦ40Х2НМАФ и АЦ30Х3НМАФБ, продолжаются работы по оптимизации технологии механической и термической обработки.

Список литературы: 1. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. М., «Машиностроение», 1980, 783 с. 2. Астащенко, В.И. Технологические методы управления структурообразованием стали при производстве деталей машин / Астащенко В.И., Шибakov В.Г. – М.: Academia, 2006 – 328 с. 3. Патент № 1301856 Российская Федерация, МКИ³ С21Д ¹/₇₈. Способ термической обработки заготовок / Астащенко В. И., Янцен Г. И., Ивановский С. В.; заявитель и патентообладатель Камское объединение по пр-ву большегрузных автомобилей. - №4015708/22-02 заявл. 14.11.85. 4. Патент №1534067 Российская Федерация, МКИ³ С21Д ¹/₂₆. Способ термической обработки заготовок / Астащенко В. И., Янцен Г. И. [и др.]; заявитель и патентообладатель Камское объединение по пр-ву большегрузных автомобилей. - №4438814/23-02 заявл. 08.06.88; опубл. 07.01.90 Б.И. №1.

Сдано в редакцию 12.01.2009