

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 тяжело нагруженных 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 выражалось 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 Ø 5,5 мм и Ø 5,7 мм – подача 0,1 мм/об при скорости 660 об/мин
- Для сверл Ø 8,5 мм и Ø 8,7 мм – подача 0,17 мм/об при скорости 400 об/мин
- Для сверл Ø 9,0 мм и Ø 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 _{ауст} °С | Охлаждающая среда | T _{отп} °С | 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°С/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* цементированного 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].

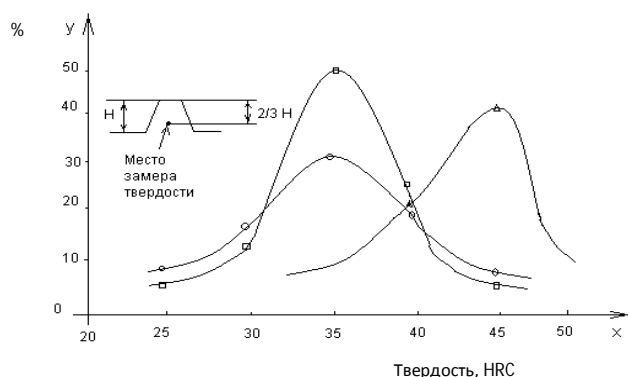


Рис. 1. Частота (%) распределения твердости сердцевины зуба шестерен с различным модулем после ХТО. Сталь 20ХГНМТА. Количество партий деталей – 85 шт: ○ – исходное состояние стали ($\Pi \frac{HRC}{9}$); Δ – модуль $m=5$ мм; □ – модуль $m=8.7$ мм

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 экономолегированная 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 О90 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 , % | КСУ, 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].

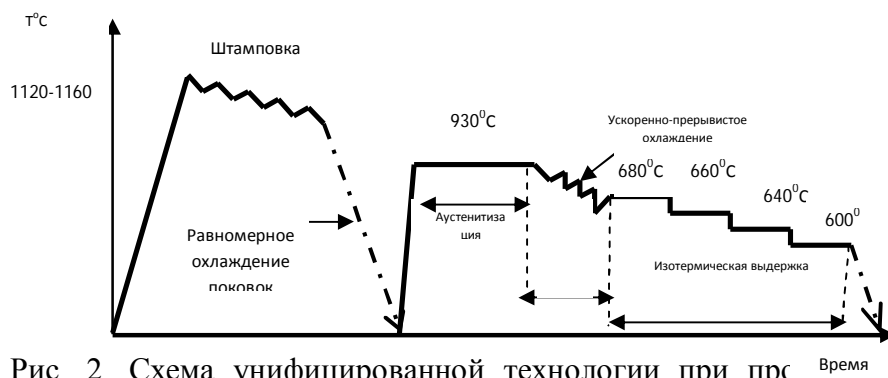


Рис. 2. Схема унифицированной технологии при производстве заготовок из цементуемых легированных сталей

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.

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 аустенитизации 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., Шибиков 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.

Надійшла до редколегії 07.04.2009 р.

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

Астащенко В.И., Соловейчик С.С., Астащенко Т.В., Сосновский А.П.

Стаття присвячена дослідженню властивостей сталей АЦ40Х2НМАФ, АЦ30Х3НМАФБ і 18ХГР і їх дослідно-промисловій апробації при виготовленні важконавантажених деталей автомобіля «КАМАЗ».

сталь, обработка, структура, прокаливаемость, автомобиль