

**2. Голубцова, Е.С.** Основы научных исследований в порошковой металлургии и сварке: учебное пособие / Е.С. Голубцова, Б.А. Каледин, Н.Б. Каледина. – Минск: БНТУ, 2008. – 240 с.

*УДК 669.041*

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**П.С. ГУРЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**Т.Н. СЕНИЧЕНКО** (БНТУ),  
**А.И. МИХЛЮК**, канд. техн. наук (ОАО «МАЗ»)

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОКОВОК ГРУЗОВОЙ АВТОТЕХНИКИ**

**Введение.** Получение заданных свойств деталей автомобиля, адекватных условиям ее эксплуатации, всегда было актуальным, так как решение данной задачи позволяло получить равнопрочную конструкцию автомобиля, что является оптимальным как с технической, так и экономической стороны. Для деталей, которые в процессе изготовления подвергаются различным видам технологических операций, связанных с многократным нагревом, прогнозирование заданных свойств конечной детали следует начинать на самых первых стадиях ее изготовления. Одним из важнейших параметров, определяющих качество поковок, является формирование требуемой структуры металла, которое достигается предварительной термической обработкой.

В 2010 г. в кузнечном производстве ОАО «МАЗ» термической обработке подвергали поковки различной конфигурации и массой от 1 до 80 кг с годовым объёмом более 9000 т. Применяются в основном следующие виды термической обработки поковок:

– нормализация (для исправления крупнозернистой структуры послековки подвергаются поковки из углеродистых, среднелегированных и сложнелегированных сталей, подлежащих последующей цементации);

– улучшение (для формирования окончательной структуры) перед механической обработкой и поверхностным упрочнением (ТВЧ, ионное азотирование).

**Анализ предварительной термической обработки поковок.** На большинстве машиностроительных заводов, в том числе и на ОАО «МАЗ», большое количество заготовок изготавливают методом горячейковки и штамповки. Поковки после горячего деформирования, как правило, подвергаются термической обработке. В ряде случаев термическая обработка является предварительной и служит для улучшения обрабатываемости поковок при обработке резанием или пластической деформацией, устранения дефектной структуры, придания наследственной мелкозернистости при окончательной термообработке. При этом поковки из низколегированных и углеродистых сталей (35, 40, 45, 40Х, 40ХН и др.) для улучшения обрабатываемости резанием подвергаются полному отжигу или нормализации (иногда с последующим высоким отпускком). Твердость после нормализации для углеродистых сталей (30, 35, 40, 45) не превышает НВ 230, а для легированных (40Х, 45Х, 40ХН) – НВ 240–250, что обеспечивает их удовлетворительную обрабатываемость. Для получения наивысшей обрабатываемости в условиях крупносерийного производства для поковок из этих сталей также может быть рекомендован изотермический отжиг.

Хорошая обрабатываемость поковок из легированных цементуемых сталей (18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ, 20Х2Н3А и др.) может быть получена нормализацией или изотермическим отжигом. При этом наилучшая обрабатываемость достигается при однородной дифференцированной феррито-перлитной структуре с равноосными зёрнами с твердостью феррита 1400–2200 МПа и перлита не более 3000 МПа. Если твердость составляющих выше этих пределов, то увеличивается износ режущих инструментов, если ниже – ухудшается чистота обрабатываемой поверхности. При этом разность твердости перлита и феррита должна быть минимальной (не выше 800 МПа) [1]. В ряде случаев для получения высокой обрабатываемости для сталей 12ХН3А, 20ХН3А, 20Х2Н4А, 20ХГНТР, 25ХГНМ после нормализации выполняют высокий отпуск (600–700 °С) с получением твердости не более НВ 240. Хорошая обрабатываемость заготовок последующим холодным деформированием (например, протяжка или накатка шлицевых поверхностей) достигается отжи-

гом на зернистый перлит при температурах, максимально близких к точке  $A_{c1}$ , но не превышающих ее (650–700 °С).

Часто термическая обработка поковок является окончательной и определяет их эксплуатационные свойства. К таким деталям относятся рычаги, цапфы, шатуны, кронштейны, вилки, корпусные и многие другие детали автотехники. Обработка таких поковок требует особенно тщательного выбора, соблюдения и контроля технологических параметров, так как допущенные при термообработке ошибки выявляются только путем преждевременного выхода из строя деталей, узлов и автомобиля в целом. Чаще всего поковки из среднеуглеродистых малолегированных сталей, не нуждающиеся в окончательной термической обработке, подвергают улучшению. Такие детали в дальнейшем подвергаются минимальной механической обработке отдельных поверхностей резанием либо шлифованием.

**Обоснование возможности отказа от дополнительной операции нормализации поковок.** Из опыта изучения структуры и твердости поковок деталей кузнечного производства ОАО «МАЗ» установлено, что наиболее частыми отклонениями после нормализации поковок массовых деталей автомобиля из среднеуглеродистых и экономнолегированных сталей (45Х, 40ХН, 20ХН3А, 25ХГТ) являются случаи появления в структуре участков грубозернистой структуры и структуры типа мартенсита, видманштетта или бейнита. При соответствии твердости, указанной в технологической и конструкторской документации, наличие этих составляющих резко ухудшает обрабатываемость заготовок на последующих операциях изготовления и приводит к повышенному расходу режущего инструмента, трудоемкости и поломкам оборудования.

Поэтому каждый случай появления таких структур даже на небольшом количестве партии поковок вызывает сбой ритмичности производства, так как вся партия поковок возвращается в термическое отделение для исправления структуры путем дополнительной термической обработки. Для гарантированного исправления таких структур в практике ОАО «МАЗ» применяют полный отжиг с последующей повторной нормализацией на заданную твердость с получением феррито-перлитной структуры.

Для установления и устранения причин брака термической обработки выполнены обследования печного оборудования и проверка

технологических процессов на соответствие фактических температурных режимов печей, а также и на поверхности поковок задаваемым технологическим параметрам.

Для устранения этих негативных явлений при термической обработке поковок температуру в рабочем пространстве печи заведомо повышали до 890–900 °С с целью гарантированного достижения полноты протекания процессов аустенизации. Такое распределение температуры по зонам печи приводит к формированию неудовлетворительной структуры.

Из-за несовершенств конструкции футеровки печей, газогорелочных устройств, контрольной и регулирующей аппаратуры, а также имевших место ошибок операторов и обслуживающего персонала при выполнении операций нормализации в печах старой конструкции не удавалось точно выдерживать задаваемый интервал температур  $850 \pm 10$  °С для поковок из среднеуглеродистых низколегированных сталей 45, 40ХН, 25ХГТ, 40Х, составляющих основную массу поковок, по всему объему садки заготовок (в центре садки и в отдельных зонах печи температура оказывалась заниженной на 40–50 °С), что являлось причиной неудовлетворительной структуры (сохранение участков грубой ковочной структуры, участков пятнистой твердости и плохой обрабатываемости поковок).

В ряде случаев для исправления неудовлетворительной структуры и получения гарантированной обрабатываемости поковок выполняли дополнительный высокий отпуск или закалку с высоким отпуском. Часть поковок подвергали повторной нормализации. Все эти дополнительные операции приводили к необоснованному увеличению трудоемкости и энергозатрат.

Внедрение современного высокоавтоматизированного энергосберегающего термического оборудования с автоматизацией контроля, регулирования и документирования всех режимов термической обработки и работы исполнительных механизмов позволяет оптимизировать процессы термической обработки. При этом в ряде случаев, благодаря точному соблюдению технологических параметров, появляется возможность сократить длительность и температуру нагрева под закалку, нормализацию, отжиг и другие операции, или вывести отдельные операции из технологического процесса, заменить более энергоемкие технологические процессы улучшения на процесс регулируемой нормализации.

В 2008–2009 гг. на ОАО «МАЗ» в условиях действующего производства были демонтированы устаревшие агрегаты нормализации № 74 и ТО-40 и агрегат улучшения № 71, 72 и введены в эксплуатацию термические агрегаты производства фирмы «Elterma» мод. APN-1800G (нормализация) и APN-1500G (улучшение), которые позволяют точно регулировать температуру и соблюдать оптимальный характер распределения температуры по зонам печи, обеспечивая при этом заданные твердость, структуру и обрабатываемость в результате однократного цикла термической обработки.

В настоящей работе приведены результаты исследований по совершенствованию существующих процессов и оптимизации режимов предварительной термообработки поковок с целью экономии энергоресурсов.

**Материалы и методика.** В таблице 1 приведен химический состав исследованных рычагов, из которых в дальнейшем были вырезаны и испытаны стандартные образцы на прочность при растяжении и ударную вязкость по стандартным методикам.

Таблица 1 – Химический состав рычагов автомобилей МАЗ, %

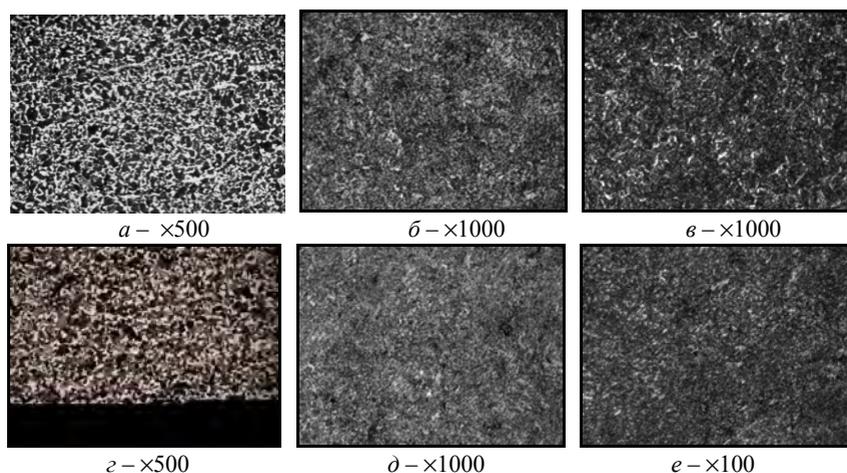
	№ детали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
101-3001031 «Рычаг трапеции левый»	1	0,39	0,25	0,59	0,021	0,030	0,54	1,04	0,26
	2	0,38	0,24	0,59	0,020	0,030	0,54	1,05	0,30
	3	0,38	0,24	0,59	0,021	0,030	0,54	1,06	0,26
5440-3001035 «Рычаг поворотный»	1	0,38	0,30	0,58	0,018	0,021	0,54	1,00	0,26
	2	0,38	0,30	0,58	0,017	0,018	0,54	1,00	0,26
	3	0,38	0,30	0,56	0,017	0,019	0,54	1,00	0,26
<i>Сталь 40XH ГОСТ 4543-71</i>									

На рисунке 1 показаны типовые детали-представители. Нормализацию выполняли в толкательном агрегате APN-1800G. Загрузку поковок 5440-3001035 «Рычаг поворотный» массой 1 шт. 5,5 кг (рисунок 1, а) производили путем укладки на поддон по 90 шт. (общая масса деталей на одном поддоне составляла 495 кг).



и последующего улучшения для окончательного формирования структуры и свойств.

Выполненные исследования показали, что при точном регулировании режимов термической обработки можно отказаться от предварительной нормализации с достижением заданной структуры и высоких прочностных свойств, таких же, как и для деталей, подвергаемых предварительной нормализации. На рисунке 2 представлены микроструктуры рычагов из стали 40ХН после термообработки (верхние рисунки – рычаг поворотный, нижние – рычаг трапеции левый).



*a, z* – нормализация; *б, d* – нормализация + улучшение; *в, e* – улучшение

Рисунок 2 – Микроструктура рычагов из стали 40ХН после термообработки

Микроструктура после нормализации представляет собой перлит сорбитообразный + феррит, зерно № 7 ГОСТ 5639-82 (рисунок 2, *a, z*), твердость составляла 201 НВ (рисунок 2, *a*) и 187 НВ (рисунок 2, *z*). После улучшения с предварительной нормализацией микроструктура рычага поворотного представляет собой сорбит + прожилки феррита с твердостью 262–269 НВ, а для рычага трапеции – сорбит с твердостью 277–285 НВ. Микроструктура после улучшения без предварительной нормализации рычага поворотного представляет собой сорбит + прожилки феррита с твердостью

262–269 НВ, а для рычага трапеции – сорбит с твердостью 277–285 НВ.

Из-за неудовлетворительного состояния печей устаревшей конструкции не удавалось точно выдерживать задаваемый интервал температур  $850 \pm 10$  °С для поковок из среднеуглеродистых низколегированных сталей 45, 40ХН, 25ХГТ, 40Х, что являлось причиной неудовлетворительной структуры (видманштетт, грубые выделения избыточного феррита).

Из-за этого при нагреве под закалку аустенит не успевал полностью гомогенизироваться. Участки аустенита, соответствующие местам залегания грубых включений феррита, обеднены углеродом, и после закалки не приобретали необходимую твердость. Нормализацию применяли для устранения пороков стали, возникших при горячей деформации и термической обработке: крупнозернистости, видманштеттовой структуры, строчечности. При повторном нагреве в аустенитную область зерно получается более мелким. Но при определенных условиях, например, при наличии в структуре видманштетта, при повторном нагреве, когда вновь образуется аустенит, размер, форма и кристаллографическая ориентировка зерен могут быть такими же, как у исходного зерна аустенита перед первым перлитным превращением.

Таким образом, выполнение предварительной нормализации для подготовки структуры не приводит к получению более тонкой структуры, а, следовательно, не приведет к получению более высоких механических свойств. Результаты испытаний механических свойств образцов, вырезанных из исследованных рычагов, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний механических свойств образцов

	Вид термо-обработки	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
поворотный	Нормализация	700	24	33	56
	Нормализация + улучшение	910	21	37	125
	Улучшение	920	21	40	140
Рычаг трапеции	Нормализация	720	25	32	69
	Нормализация + улучшение	840	22	35	149
левый	Улучшение	830	20	36	144

Как видно из таблицы 2, комплекс механических свойств деталей «рычаг поворотный» и «рычаг трапеции левый» после улучшения с предварительной нормализацией и без нее практически одинаковый. Для детали «рычаг поворотный» временное сопротивление  $\sigma_b$  после улучшения с предварительной нормализацией составило 910 МПа, без предварительной нормализации – 920 МПа, соответственно относительное удлинение 21 %, ударная вязкость – 125 и 140 Дж/см<sup>2</sup>. Для детали «рычаг трапеции левый» временное сопротивление  $\sigma_b$  после улучшения с предварительной нормализацией составило 840 МПа, без предварительной нормализации – 830 МПа, соответственно относительное удлинение 22 и 20 %, ударная вязкость – 149 и 144 Дж/см<sup>2</sup>.

При сравнении механических свойств деталей после нормализации и улучшения видно, что ударная вязкость после улучшения практически в 2–2,5 раза выше, чем после нормализации. Учитывая тот факт, что твердость после улучшения находится на уровне, позволяющем проводить механическую обработку, проведение предварительной операции нормализации нецелесообразно.

По нашему мнению, полученные результаты свидетельствуют об определенной роли фосфора (при прочих равных условиях) при формировании механических свойств стали. Главная цель улучшения – требуемым образом перераспределить фосфор в структуре стали. После горячей обработки давлением он располагается на границах крупных аустенитных зерен [4]. Перед закалочным охлаждением должно закончиться растворение избыточного феррита в аустените, при этом фосфор должен успеть перераспределиться на границах новых мелких аустенитных зерен. После высокого отпуска, когда сталь имеет структуру зернистого типа сорбит отпуска, фосфор, растворяясь в феррите (сорбита отпуска), перемещается, вероятно, на граничные поверхности цементитных включений сорбита отпуска. Именно в этом случае достигается улучшение всего комплекса механических свойств. Из данных металлографического анализа и механических свойств видно, что выполнение предварительной нормализации для подготовки структуры не приводит к получению более тонкой структуры и к получению более высоких механических свойств.

Внедрение современного высокоавтоматизированного энерго-сберегающего термического оборудования позволило оптимизировать процессы термической обработки. Данное оборудование позволяет строго соблюдать технологические параметры, в результате чего заданные твердость, структура и обрабатываемость гарантированно достигаются в результате однократного цикла термической обработки. В связи с этим экономически целесообразным является снятие операции предварительной нормализации из технологического цикла.

**Экономические показатели.** При снятии операции нормализации для номенклатуры рычагов (18 наименований) из стали 40ХН в кузнечном цехе ОАО «МАЗ» освобождаются мощности агрегата APN-1800G на 13,5 ч в месяц. Экономия природного газа при среднем расходе 87 м<sup>3</sup>/ч в течение месяца составит 1174,5 м<sup>3</sup>. Дополнительно экономится электроэнергия, расходуемая на привод исполнительных механизмов и системы управления в количестве 50,15 кВт·ч, что за месяц составит 681 кВт·ч. За год экономия только энергоресурсов составит 14 094,0 м<sup>3</sup> природного газа и 8 174,4 кВт·ч электроэнергии, что позволяет получить годовую экономию в сумме 7 715 586,6 руб. Фактический экономический эффект от использования результатов за семь месяцев (01.10.2010–30.04.2011) составил 14,4 млн. руб.

**Перспективы дальнейшей оптимизации процессов термической обработки изделий машиностроения.** Современное оборудование для предварительной термообработки поковок, имеющее высокую точность распределения температуры по всему объему печного пространства, регулируемое охлаждение садок, полная автоматизация процесса создает широкие перспективы по оптимизации режимов предварительной термообработки. Проведенные на ОАО «МАЗ» работы свидетельствуют о необходимости поэтапного пересмотра технологических процессов для деталей автотехники, имеющих промежуточные виды термообработки. Кроме того, высокая точность регулировки температур по зонам печи  $\pm 5$  °С позволяет снизить технологическую температуру до требуемой по ГОСТ для различных марок сталей.

Регулирование скорости охлаждения в агрегате нормализации APN-1800G по предварительным исследованиям может обеспечить

прочностные характеристики деталей, не уступающих деталям, проходящим улучшение. Опыт ОАО «МАЗ» может быть рекомендован для многих машиностроительных предприятий республики, осуществляющих переоснащение термических производств.

**Заключение.** Комплекс выполненных работ позволил научно обосновать и экспериментально подтвердить целесообразность исключения операции нормализации для номенклатуры рычагов (18 наименований) из стали 40ХН в кузнечном цехе ОАО «МАЗ». Экономия природного газа при среднем расходе 87 м<sup>3</sup>/ч в течение месяца составит 1174,5 м<sup>3</sup>, дополнительно экономится электроэнергия, расходуемая на привод исполнительных механизмов и системы управления, в количестве 50,15 кВт·ч, что за месяц составит 681 кВт·ч. За год экономия только энергоресурсов составит 14094,0 м<sup>3</sup> природного газа и 8 174,4 кВт·ч электроэнергии, что эквивалентно 7,72 млн. руб. в год. Фактический экономический эффект от использования результатов за семь месяцев (01.10.2010–30.04.2011) составил 14,4 млн. руб.

Оптимизация и точное соблюдение технологических параметров позволяют сократить длительность и температуру операций термообработки, или вывести отдельные операции из технологического процесса, заменить более энергоемкие технологические процессы улучшения на процесс регулируемой нормализации.

## Литература

**1. Башнин, Ю.А.** Технология термической обработки стали / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секкей. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.

**2. Биронт, В.С.** Теория термической обработки металлов. Комбинированные методы: учебное пособие / В.С. Биронт. – Красноярск: СФУ: ИЦМиЗ, 2007. – 152 с.

**3. Гуляев, А.П.** Термическая обработка стали / А.П. Гуляев. – М.: МАШГИЗ, 1960. – 490 с.

**4. Сталь** на рубеже столетий / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.

**5. К проблеме** энергосбережения и повышения качества термической обработки / В.М. Константинов [и др.] // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2008. – Вып. 31. – С. 145–150

*УДК 669.14.018*