

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕЙ Пониженной ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ МАЗ

Михлюк А.И., к.т.н. РУП «МАЗ»

**Введение.** *Стали пониженной прокаливаемости (ПП)* — это углеродистые стали с пониженным содержанием примесей, суммарное содержание которых не должно превышать 0,5%. Как класс эти стали появились в 60-ых годах прошлого столетия и предназначались для изготовления тяжело нагруженных деталей механизмов. При этом создание и освоение сталей класса ПП неразрывно связано с технологией их упрочнения — объёмно-поверхностной закалкой. К таким сталям относят 55ПП, 60ПП, 80ПП. Близкими по своим свойствам к этим сталям являются инструментальные стали У6А — У8А. Главным показателем для сталей ПП является величина прокаливаемости, которая характеризуется идеальным критическим диаметром закали D<sub>кр</sub>, интервал которого оговаривается ГОСТом или ТУ на каждую плавку стали. В настоящее время насчитывается три поколения данного класса сталей.

Стали ПП 1-го поколения, выплавлялись на сталелитейных предприятиях СССР с 60-ых годов 20 века (Донецкий металлургический завод, Челябинский металлургический комбинат, Череповецкий металлургический завод и др.) Они имели следующие модификации: сталь 58 (ГОСТ 1050-88), сталь 54, сталь 60 — ТУ завода производителя.

Отличительные особенности серийных сталей ПП 1-го поколения:

- химический состав: углерод — 0,50–0,65%; марганец — 0,1–0,3%; кремний — 0,1–0,3%; хром, никель, медь — не более 0,25% каждого;

- после закалки с индукционного нагрева достигалось мелкое зерно аустенита №10-12 ГОСТ 5639-88 и высокий комплекс механических свойств.

Стали ПП 2-го поколения отличались от предыдущего более узким и стабильным интервалом значений прокаливаемости  $D_{кр}=8-10$  мм, 10–12 мм, 12–14 мм; размер зерна № 11–12 — при индукционном, № 10–11 — при печном нагреве, меньшей зависимостью величины прокаливаемости и величины зерна от температуры нагрева под закалку.

Это достигалось за счет:

- проведения выплавки при раскислении алюминием, который, взаимодействуя с азотом, обра-

зует мелкодисперсные нитриды, препятствующие росту зерна аустенита при нагреве под закалку;

- ограничения содержания обычных примесей — марганца, кремния, хрома, никеля и меди не более 0,1% каждого, что достигалось применением при плавке чистого передельного чугуна.

- применения марганца и кремния в количестве, обеспечивающем их содержание 0,1–0,2% каждого, что является главным фактором регулирования глубины прокаливаемости.

Стали ПП 2-го поколения способны обеспечить стабильность глубины слоя закали.

Характерным представителем этого поколения сталей ПП является сталь 60ПП, с содержанием углерода 0,57-0,61% химический состав которой соответствует химическому составу стали 60 по ГОСТ 1050 — со следующими отклонениями: массовая доля марганца не более 0,20%, кремния 0,1–0,3 %, хрома не более 0,15%, допускается в виде технологической добавки, в зависимости от поставщика, массовая доля титана (не более 0,10%) или ванадия (0,02–0,05%). Причем суммарное содержание примесей не должно превышать 0,5%. Применение марки стали пониженной прокаливаемости с такими показателями обеспечивало требуемые значения прокаливаемости при приемлемой стоимости и сложности получения. Важнейшим показателем для данной марки является величина прокаливаемости, которая строго оговаривается при поставке.

На рис. 1 представлен график прокаливаемости различных профилей стали 60ПП производства Белорусский металлургический комбинат г. Жлобин РБ.

В настоящее время имеется ряд публикаций о том, что в РФ разработаны и применяются стали пониженной прокаливаемости третьего поколения.

Отличительной особенностью этого поколения сталей ПП является то, что вводятся новые легирующие компоненты, такие как медь, алюминий и ванадий. Техническим результатом таких добавок является достижение гарантированной стабильности по пониженной прокаливаемости и получение сверхмелкого зерна закаленной стали

величиной на уровне 11–12 баллов при закалке с температур в диапазоне от  $A_{c3}$  до  $A_{c3} + 100^\circ\text{C}$ .

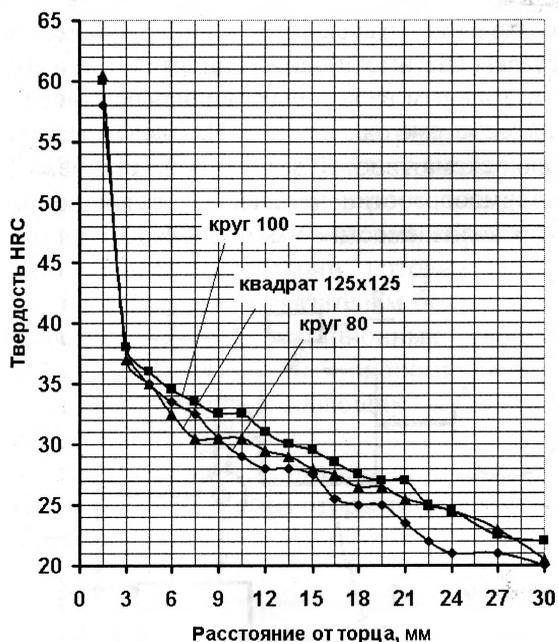


Рис. 1. График прокаливаемости различных профилей стали 60ПП производство БМЗ по ГОСТ 5657-69 «Сталь. Метод испытания на прокаливаемость»

Таким образом, для сталей ПП всех поколений можно выделить следующее:

1. Критическая скорость закалки значительно (в 4-7 раз) превышает критическую скорость закалки для стандартных углеродистых сталей, что требует интенсивного и равномерного закалочного охлаждения.

2. Низкая прокаливаемость стали сохраняется при нагреве до определенного интервала температур, при превышении которого ( $>A_{c3}$  на 60 до  $100^\circ\text{C}$ ) величина прокаливаемости резко возрастает.

Мартенсит закалки по сравнению с обычными конструкционными сталями малоустойчив, что при нагреве приводит к интенсивному его распаду.

**Объемно-поверхностная закалка.** Как уже говорилось выше, стали пониженной прокаливаемости и их промышленное применение неразрывно связаны с методом объемно-поверхностной закалки (ОПЗ), который был разработан в 60-х годах прошлого столетия известным советским специалистом в области индукционной термообработки профессором Шепеляковским К.З. Разработка этого метода явилось результатом научных исследований в области индукционной термообработки проводимых во второй половине прошлого столетия учеными СССР. Сущность его состоит в том, что упрочняемое изделие из стали ПП после по-

верхностного индукционного или сквозного (печного или индукционного) нагрева подвергается высоко интенсивному закалочному охлаждению. При этом на поверхности на глубину прокаливаемости образуется мартенситная структура, а слои нагретые выше точки  $A_{c3}$ , но расположенные глубже закалываются на структуру троостита, сорбита и перлита, обеспечивая тем самым плавный переход твердости от поверхности к основному металлу. Глубинный характер нагрева определяет и требуемые мощности и скорости нагрева. Удельная мощность нагрева обычно составляет не более  $0,2 \text{ кВт/см}^2$ , а скорость нагрева не превышает  $10\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C/с}$ .

На рис. 2 представлено распределение твердости от поверхности упрочняемой детали при различных видах термообработки. При химико-термической обработке, в частности цементации (кривая 1), достигается высокая твердость поверхности с плавным переходом к основному металлу при сравнительно невысокой глубине упрочненного диффузионного слоя. Для поверхностной закалки ТВЧ характерно наличие четко выраженной зоны закалки ТВЧ и резкое падение твердости от закаленного поверхностного слоя к основному металлу (кривая 2). Объемно-поверхностная закалка (кривая 3), обеспечивая одинаковую с цементацией и поверхностной закалкой твердость на поверхности, имеет более высокую твердость сердцевины, что и обеспечивает в итоге более высокие прочностные и эксплуатационные свойства.

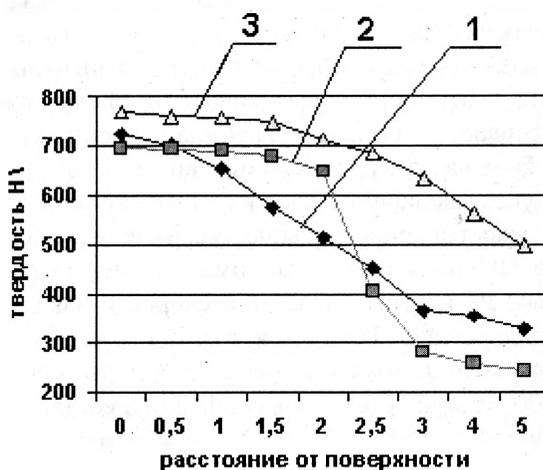


Рис. 2. Распределение твердости при различных технологиях упрочнения: 1 — цементация; 2 — закалка ТВЧ; 3 — объемно-поверхностная закалка

На рис. 3 показаны макрошлифы шестерен из различных сталей класса ПП закаленных по ме-

тоту ОПЗ.

На рис. 3 отчетливо видны зоны термического влияния:

— для поверхностного индукционного нагрева три зоны: зона закали по контуру зуба, зона нагрева и основной металл;

— для объёмного нагрева две зоны: зона закали по контуру зуба и зона нагрева.

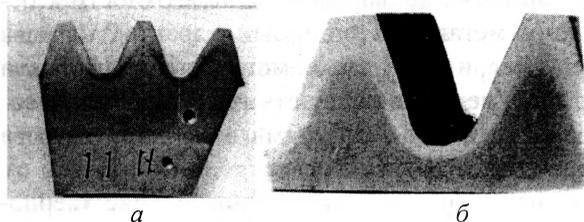


Рис 3. Макрошлифы шестерен из стали ПП закаленных по методу ОПЗ: а — цилиндрическая прямозубая шестерня автомобиля МАЗ, модуль  $m=6,25$ , сталь НИПРО, нагрев поверхностный индукционный; б — коническая шестерня с круговым зубом главной передачи автомобиля МАЗ, с внешним окружным модулем  $m=16$ , сталь У8А, нагрев объёмный печной

Таким образом, объемно-поверхностная закалка по сравнению с другими видами термической обработки обладает рядом преимуществ.

1. По сравнению с термическим улучшением — наряду с упрочненной сердцевиной получается значительно более прочный и твердый поверхностный слой. Кроме того, возникающие сжимающие напряжения повышают усталостную прочность.

2. По сравнению с ХТО в частности цементацией — твердость поверхности незначительно выше, но обеспечивается большая глубина слоя с высокой твердостью и более высокая твердость сердцевины.

3. По сравнению с высокочастотной закалкой обеспечивается большая глубина упрочненного слоя, большая твердость сердцевины и плавный переход от закаленного слоя к основному металлу.

Как уже говорилось выше, упрочнение сталей класса ПП по методу ОПЗ имеет свои отличия, главным из которых являются скорости закалочного охлаждения. Например, для стали 45 критическая скорость охлаждения лежит в интервале  $150-300^{\circ}\text{C}$ , а для сталей класса ПП она составляет величину  $400-1500^{\circ}\text{C}$ . При закалке в спрейере или ином закалочном устройстве, широко применяемом при индукционной термообработке, скорости охлаждения лежат в интервале  $1000-10000^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от расхода и температуры воды, зазоров в спейере, размеров закаливаемой поверхности и детали и др.). То есть, при закалке сталей пони-

женной прокаливаемости превышение действительной скорости охлаждения над критической значительно меньше, чем для иных сталей. Поэтому создаваемые закалочные установки для деталей из сталей ПП имели свои отличительные особенности, главным из которых явились особые требования к системе охлаждения. На рис 4 представлена блок-схема типовой закалочной установка ТВЧ для термообработки деталей из сталей пониженной прокаливаемости по методу ОПЗ.

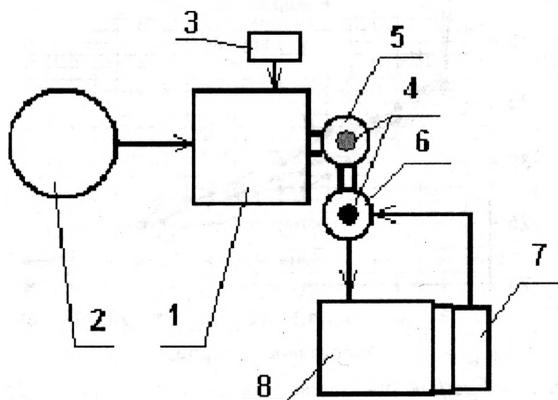


Рис 4. Блок-схема установки ТВЧ для закалки по методу ОПЗ. 1 — нагревательный блок; 2 — генератор ТВЧ; 3 — пульт управления; 4 — упрочняемая деталь; 5 — позиция нагрева; 6 — позиция охлаждения; 7 — насос; 8 — бак системы закалки

Для обеспечения высоких скоростей закалки для сталей пониженной прокаливаемости установка в отличие от большинства закалочных индукционных установок имеет дополнительное оборудование для охлаждения деталей (поз. 7 и 8). Для этого установка комплектуется отдельным насосом высокой производительности и баком для закалочной среды. Как правило, операции нагрева и охлаждения разделяют (поз. 5 и 6). Это обеспечивает удобное размещение оборудования, высокую производительность установки, так как время нагрева при ОПЗ всегда превышает время закалки. Установка работает следующим образом: Деталь 4 нагревается на позиции нагрева 5 и перемещается на позицию закалки, где с помощью специального насоса производится её интенсивное охлаждение.

Данная структурная схема установки была разработана в 60 годах прошлого столетия и до сегодняшних дней не претерпевала значительных изменений.

**Технико-экономические преимущества.** Устойчивое развитие промышленности в РБ, жесткая конкуренция на рынке, повышении стоимости

энергоресурсов в настоящее время вызвало повышенный интерес специалистов к сталям ПП и объёмно-поверхностной закалке. Главным двигателем этого интереса является высокая технико-экономическая привлекательность этого материала и технологии.

Прежде всего, следует рассматривать технологию ОПЗ со сталями ПП как альтернативу широко применяемой на машиностроительных предприятиях РБ химико-термической обработки, в первую очередь цементации, которые при равных, а по некоторым показателям более высоких прочностных и эксплуатационных свойствах, обеспечивают значительный экономический эффект за счет трех составляющих — материала, технологии и оборудования.

**Материал.** На рис. 5 показана стоимость стали 60ПП в сравнении с некоторыми сталями, применяемыми при ХТО.

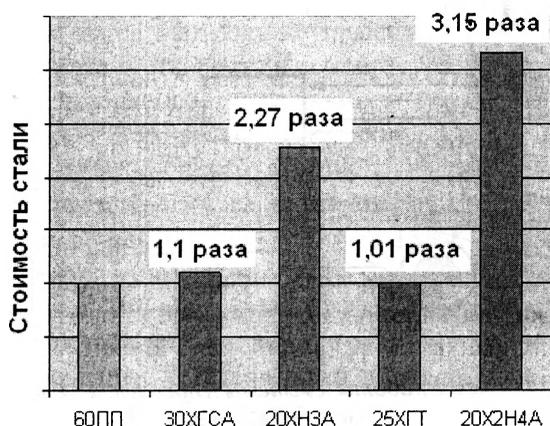


Рис. 5. Сравнительная стоимость стали 60ПП со сталями, применяемыми при ХТО

Как видно на диаграмме, особенно значительна разница в стоимости для никелесодержащих сталей, которые применяются для широкой гаммы высоконагруженных деталей, например шестерен трансмиссии в автомобилестроении.

**Технология.** Технология ОПЗ по сравнению с ХТО обеспечивает значительный экономический эффект по энергоресурсам. Цикл термообработки сокращается с десятков часов до нескольких минут, затраты электроэнергии уменьшаются в 10...12 раз, исключается потребление природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов, выбросы вредных испарений, дыма, сажи, тепла и газов в окружающую среду.

**Оборудование.** Стоимость оборудования для ОПЗ сравнима со стоимостью индукционной установки, что в 8–12 раз дешевле оборудования

для химико-термической обработки.

Все вышеперечисленное позволяет утверждать, что стали класса ПП в сочетании с объёмно-поверхностной закалкой позволяют решить целый ряд задач по снижению себестоимости продукции. Опыт такого применения в республике имеется на ряде промышленных предприятий.

**Практическая реализация.** На РУП «МАЗ» успешно реализовано внедрение стали ПП и технологии ОПЗ для шестерен заднего моста автомобиля. На рис. 6 представлен задний мост автомобиля МАЗ, в котором до недавнего времени практически все шестерни изготавливались из специальных сталей, в частности 20ХН3А, и подвергались цементации.

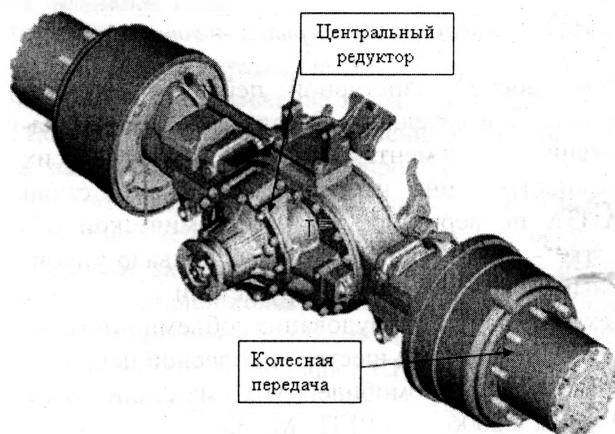


Рис. 6. Внешний вид заднего моста автомобиля МАЗ

Все шестерни в заднем мосте автомобиля расположены в основном в двух узлах: центральный редуктор и колесная передача. В настоящее время успешно решена проблема изготовления шестерен колесной планетарной передачи из стали 60ПП. Это центральная ведущая шестерня 1 и сателлиты 2, количество которых на одну передачу 4 или 5 в зависимости от типа моста (рис. 7).

Планетарная колесная передача автомобиля МАЗ (рис. 7) является одним из важнейших узлов заднего ведущего моста и предназначена для передачи крутящего момента от двигателя на ведущие колеса и имеет в своем составе следующие зубчатые колеса или детали, имеющие зубчатые поверхности: 1 — ведущая шестерня, 2 — сателлит (в зависимости от конструкции количество сателлитов 4 или 5), и ведомая шестерня (на рис. 7 не показана). Условия работы колесной передачи предполагают постоянное вращение и передачу крутящего момента от ведущей шестерни на сателлиты и ведомую шестерню.

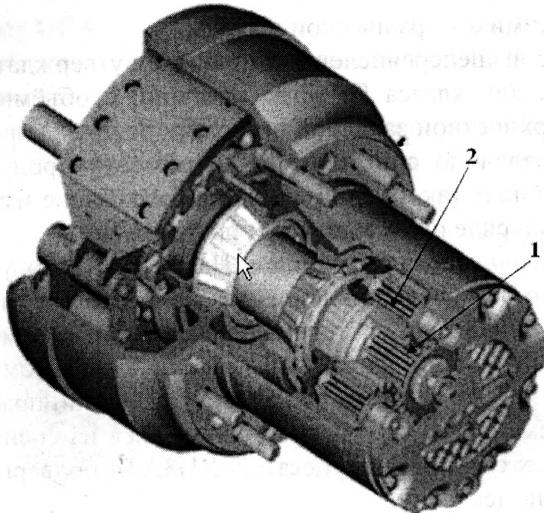


Рис. 7. Колесная планетарная передача автомобиля МАЗ. 1 — ведущая шестерня, 2 — сателлит

При работе планетарной передачи ведущая шестерня 1 и сателлиты 2 являются самыми нагруженными элементами и для обеспечения их надежности они изготавливались из стали 20ХНЗА подвергались химико-термической обработке — цементации, что обеспечивало упрочненный слой по всему контуру детали.

Технология и оборудование объемно-поверхностной закалки для шестерен колесной передачи заднего моста автомобилей МАЗ из стали 60ПП внедрены в 2006 г. на РУП «МАЗ».

Две полуавтоматические установки обеспечивают термообработку с суточным темпом около 1250 деталей при 3-хсменном режиме работы. На рис. 8 представлен общий вид участка для объемно-поверхностной закалки шестерен колесной передачи автомобиля МАЗ. Работу двух установок на участке обеспечивает один оператор. Перевод шестерен колесной передачи с цементации на объемно-поверхностную закалку позволил на 15-18% снизить загрузку оборудования для химико-термической обработки, повысить мобильность процесса изготовления шестерен.

По сравнению с ранее применяемыми установками для ОПЗ была разработана новая для закалки сталей ПП, которая представляет собой полуавтоматическую установку роторного типа имеющую восемь рабочих позиций расположенных равномерно по диаметру, из них три последовательно расположенные нагревательные (индукционный нагревательный блок), системы подачи закалочной воды, камеры охлаждения, механизма подачи деталей, датчиков, блока управления и пульта управления, смонтированных на общей раме.

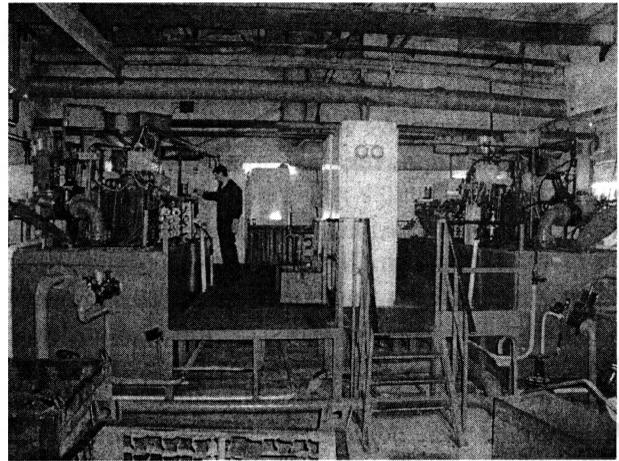


Рис. 8. Общий вид участка в составе двух установок для закалки ОПЗ шестерен колесной передачи автомобиля МАЗ

На рис. 9 показана схема работы и функциональная взаимосвязь системы управления установки.

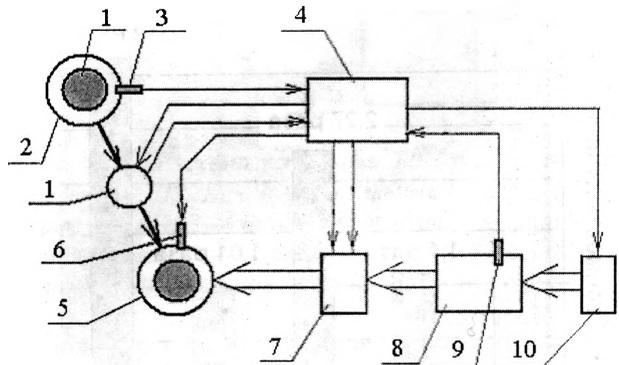


Рис. 9. Схема работы системы управления установки для закалки деталей из стали 60П: 1 — закаливаемая деталь, 2 — позиция окончательного нагрева, 3 — датчик измерения температуры нагрева детали, 4 — блок управления, 5 — камера охлаждения, 6 — датчик измерения расхода закалочной среды, 7 — пневмогидравлический клапан, 8 — бак, 9 — датчик измерения температуры закалочной среды, 10 — устройство поддержания температуры охлаждающей среды

Установка работает следующим образом. Закаливаемая деталь 1, последовательно нагреваясь на трех позициях нагрева, поступает на позицию окончательного нагрева 2, где установлен датчик 3 измерения температуры нагрева детали. Датчик регистрирует температуру нагрева и по достижении требуемой температуры, подает сигнал на блок управления 4 о готовности детали к закалке. Блок подает команду исполнительным механизмам, которые перемещают деталь в камеру охлаждения 5.

В камере охлаждения расположен датчик 6 измерения расхода закалочной воды в процессе за-

калки. В процессе закалки датчик 6 измеряет величину расхода закалочной среды в камере охлаждения 5 и подает сигнал на электронный блок управления 4, который сравнивает её с заданными значениями. При отклонении величины расхода от заданной, электронный блок управления 4 подает сигнал на пневмогидравлический клапан 7 для корректировки расхода камере 5 путем изменение величины рабочего прохода клапана 7.

В баке 8 системы подачи закалочной воды установлен датчик 9 измерения температуры. При изменении величины температуры от заданной датчик 9 подает сигнал в электронный блок 4, который управляет устройством поддержания температуры охлаждающей воды 10. В зависимости от сигнала производится либо слив горячей воды и пополнение бака холодной водой, либо подогрев ее в баке электронагревателями.

Таким образом, согласно технологическому процессу, при объёмно-поверхностной закалке производится контроль и управление параметрами нагрева — скорость и температура, и параметрами закалочного охлаждения — время закалки, температура и расход закалочной среды. Скорость индукционного сквозного нагрева детали составляет 4–8 °С/с, неравномерность нагрева детали по сечению — не более 15 °С. Скорость закалочного охлаждения — не менее 1000 °С/с.

На рис. 10 представлены фотографии макрошлифов фрагментов детали сателлит упрочненных по ранее действовавшей и внедренной технологии. Сравнение представленных макрошлифов показывает, что глубина упрочненного слоя на шестерне из стали 60ПП после объёмно-поверхностной закалки значительно больше (в 1,5–2,5 раза) чем на шестерне из стали 20ХНЗА после цементации.

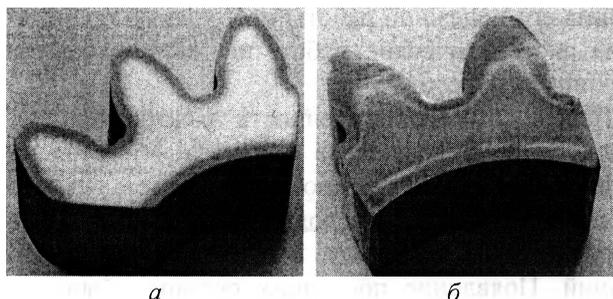


Рис. 10. Фотография макрошлифа фрагмента детали сателлит: а — из стали 20ХНЗА, прошедшей операцию цементации, б — из стали 60ПП с объёмно-поверхностной закалкой

Это обеспечивает при прочих равных условиях

значительно больший срок службы и допускает большую величину износа зубчатой поверхности при эксплуатации.

**Технико-экономический эффект.** Преимущества разработанной технологии подтверждены широким спектром выполненных на ПРУП «МАЗ» исследований и испытаний, как образцов, так и деталей, упрочненных по разработанной технологии, в частности ведущих мостов, с шестернями из стали 60ПП. Пробег опытных мостов самосвала МАЗ-5551 с шестернями колесной передачи из стали 60ПП превышает 380 тыс. км, они находятся в работоспособном состоянии и их эксплуатация продолжается.

Внедрение разработанного технологического процесса обеспечило значительную экономию материальных и топливно-энергетических ресурсов.

Обеспечено сокращение цикла упрочнения с 28 часов до 5 мин, снижение затрат электроэнергии в 11,6 раза. Исключены потребление природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов и выбросы вредных испарений, дыма, сажи, тепла и газов в окружающую среду.

Годовой экономический эффект от внедрения ОПЗ для деталей колесной передачи автомобилей «МАЗ» шестерня и сателлит на программу составил около 600 тыс. долларов США в том числе:

- электроэнергии — 2398,24 тыс. кВт/ч. или около 130 тыс. долларов США;
- природного газа — 181,95 тыс. м<sup>3</sup> или 10,6 тыс. долларов США;
- снижения стоимости металла — 433,2 тыс. долларов США.

Стоимость оборудования для объёмно-поверхностной закалки в сравнении оборудованием для химико-термической обработки в десятки раз ниже. Так, например, стоимость комплекса «Ипсен» (Германия) для химико-термической обработки подобного типа деталей с производительностью 20 шт./час составляет около 2,6 млн. долларов США, а стоимость 1 установки ОПЗ для упрочнения сателлитов колесной передачи с производительностью 74 шт./час составила около 110 тыс. долларов США.

На рис.11 показаны основные сравнительные показатели экономической эффективности внедренной технологии управляемой термообработки для шестерен планетарной передачи заднего моста автомобиля МАЗ.

**Перспективы.** В настоящее время на РУП «МАЗ» ведутся активные работы по освоению вышеуказанной технологии для шестерен цен-

трального редуктора автомобиля. В первую очередь это шестерни главной пары, рис. 12.

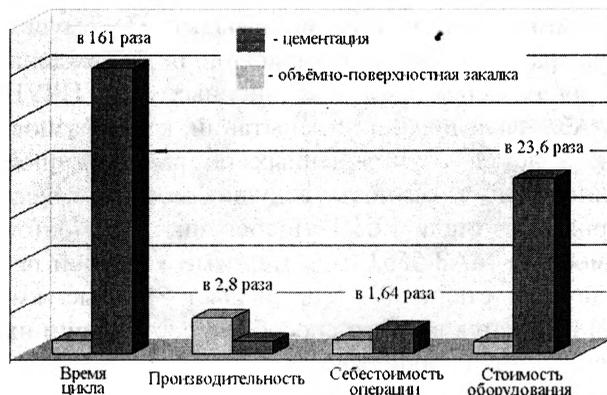


Рис. 11. Диаграмма экономической эффективности внедренной технологии упрочнения шестерен

Также имеются наработки в применении сталей ПП для деталей межколесного дифференциала.

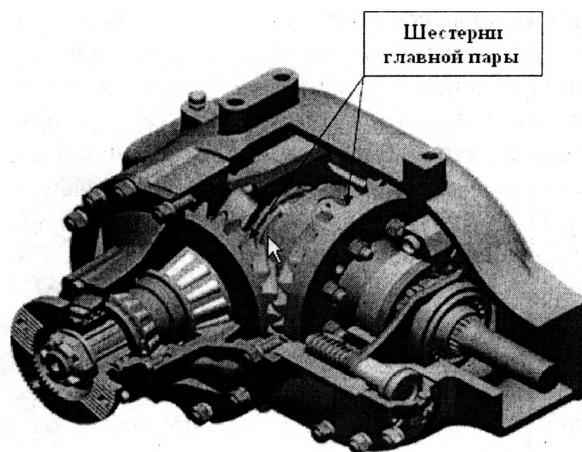


Рис. 12. Внешний вид центрального редуктора заднего моста автомобиля МАЗ

На 2008 год запланировано освоение изготовления шестерен главной пары автомобиля МА35551 из стали 60 ПП. Ориентировочно экономический эффект составит более 300 млн. рублей.

## ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Брановицкий И.И., Размыслович Г.И., Мацкевич П.Д.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси*

Весьма важную роль в обеспечении рационального использования электрической энергии, реализации потенциала энергосбережения играет качество систем ее трансформации и преобразования, т.е. качество соответствующего электроэнергетического оборудования (ЭО). Качество ЭО (как и оборудования вообще) характеризуется уровнем его технических характеристик и эксплуатационной надежностью, которые обусловлены в свою очередь соответствующим качеством составляющих компонентов и алгоритма их взаимодействия в том или ином изделии. При этом весьма важны обе связанные между собой стороны проблемы качества изделий — как повышение уровня технических характеристик оборудования, так и обеспечение его надежной и долговременной работы в «штатном» режиме. Последнее особенно актуально в условиях, когда ресурс электрооборудования, эксплуатируемого в народном хозяйстве Республики в значительной степени (на 60–70%) исчерпан. Нарушение нормального режима работы, обусловленного, на-

пример появлением дефектов в магнитопроводах или обмотках изделия, приводит к ухудшению его технических характеристик. В том числе, как правило, в нем растут, и весьма значительно, ваттные потери. При неконтролируемом развитии событий оборудование может выйти из строя с весьма серьезными последствиями. Для обеспечения его надежной работы необходимо проведение систематических работ по диагностике его технического состояния.

Надежность и долговечность электроэнергетического оборудования в значительной степени определяется, как сказано выше, состоянием его обмоток, в том числе вероятностью образования в них дефектов, например, в виде витковых замыканий. Появление последних связано обычно с разрушением изоляции благодаря воздействию вибраций, температуры и других факторов, вызванных условиями эксплуатации. Наличие короткозамкнутых контуров (КЗК), сцепленных с основным магнитным потоком в сердечнике, существенно ухудшает технические характеристики