



*The results of works about optimization and increase of construction durability of different details and intermediate products of bearings constructions of mobile machines, in particular freight and passenger technique at «MAZ» plant are presented.*

А. И. МИХЛЮК, ОАО «МАЗ»

УДК 536.46

## ИНДУКЦИОННАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ПОЛУФАБРИКАТОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

В современных мобильных машинах одной из ключевых систем, определяющей их надежность и долговечность, являются несущие конструкции. Детали, применяемые материалы и полуфабрикаты несущих систем имеют одну общую закономерность – их длина всегда превышает 1 м и достигает значений до 12–16 м. При этом точность изготовления конечного изделия высокая и может составлять доли миллиметров. Характерными представителями (рис. 1) являются несущие каркасы автобусов, поперечины и лонжероны рам, картера заднего моста грузовых автомобилей.

Требования зарубежных и отечественных потребителей по долговечности для данных кон-

струкций достигают сегодня до 1 млн. км пробега. Без разработки и применения упрочняющих технологий достичь таких значений невозможно. Большие габариты таких деталей, высокие требования по точности изготовления и долговечности требуют разработки специальных технологий упрочнения. Так, например, каркасы современных автобусов изготавливают из профильных электросварных прямошовных труб, получаемых способом холодной деформации по ГОСТ 13663-86. Технологий индукционной термической обработки данного материала в настоящее время в РФ нет. Большой практический и научный интерес представляет решение проблемы по оптимизации и по-

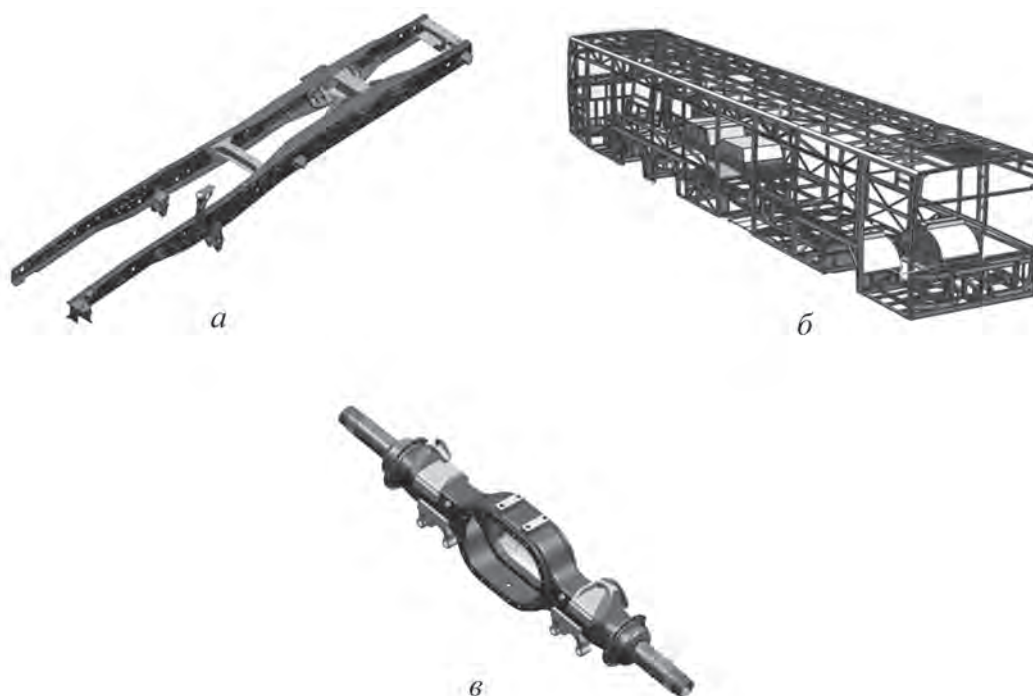


Рис. 1. Внешний вид деталей и узлов несущих конструкций мобильных машин: а – рама грузового автомобиля; б – несущий каркас автобуса; в – картер заднего моста

вышению надежности несущих конструкций и длинномерных деталей ведущих мостов мобильных машин.

Проблема термообработки деталей и полуфабрикатов несущих систем заключается в выборе оптимального соотношения трех составляющих – схемы технологии термообработки, степени автоматизации и механизации оборудования и уровня достигнутых свойств готового изделия.

На ОАО «МАЗ» накоплен определенный опыт использования технологий индукционного нагрева для термообработки длинномерных деталей и полуфабрикатов несущих конструкций мобильных машин. Все разработанные технологии и внедренные установки можно разделить несколько больших групп.

**Индукционная термообработка длинномерных деталей ведущего моста.** Разработаны технологии и внедрен ряд установок ТВЧ для закалки длинномерных деталей, в частности картеров заднего моста среднетоннажного и полнотоннажного автомобиля, полуосей цилиндрического и фланцевого типов [1].

Закалка ТВЧ-цапф картера заднего моста в сборе среднетоннажных автомобилей семейства МАЗ-4370 осуществляется непрерывно-последовательным способом в одновитковом индукторе с приставным спреером. Основной задачей при разработке данной технологии было обеспечение закалки ТВЧ с минимальными деформациями.

Для решения данной задачи специалистами ОАО «МАЗ» была разработана установка ТВЧ для закалки длинномерных деталей с длиной закаливаемых деталей от 2,0 до 2,5 м. Схема работы установки следующая: расположение детали – вертикальное, индуктор – неподвижный, деталь перемещается и вращается в центрах, закалочная среда – вода техническая. Рабочий цикл установки производится в автоматическом режиме.

При термообработке картера заднего моста автомобилей МАЗ основного семейства задача повышения его конструкционной прочности решалась в два этапа.

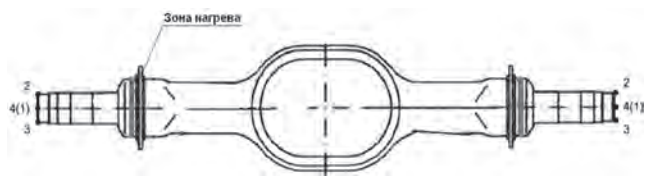


Рис. 2. Схема картера заднего моста автомобиля МАЗ с указанием зон термической обработки

**Первый этап.** Методом локальной индукционной термообработки были оптимизирована структура и прочностные показатели тяжело нагруженных сварных швов картера. Работы проводили для двух типов сварных швов – полученные методом ручной полуавтоматической сварки и методом сварки трением. Для картера заднего моста приоритетным было минимизация коробления сварной конструкции тяжелой длинномерной детали (длина картера 2280 мм, масса 110–130 кг) при соблюдении прочности и жесткости при эксплуатации. Свариваемые материалы: цапфа – сталь 30ХГСА (ГОСТ 4543-71), кожух картера – сталь 17ГС (ГОСТ 19281-89).

Для выбора оптимальных параметров технологии термообработки ТВЧ необходимо определить величину зоны термического воздействия, т. е., какие размеры околошовной зоны, кроме сварного шва, следует подвергать нагреву; параметры нагрева, т. е. температуру и скорость нагрева, градиент изменения температуры нагрева по нагреваемой толщине детали для получения требуемой структуры и твердости металла сварного шва и околошовных зон; взаимосвязь получаемых структур, коробления сварной конструкции с параметрами нагрева.

Нагрев осуществляли от преобразователя мощностью 100 кВт и частотой 2400 и 8000 Гц с различными скоростями нагрева металла, измеряемыми с помощью двух хромель-алюмелевых термопар, закрепленными на наружной поверхности сварного шва на глубине 10 мм и внутренней поверхности сварного шва. На рис. 2 показан общий вид картера с указанием зон термической обработки.

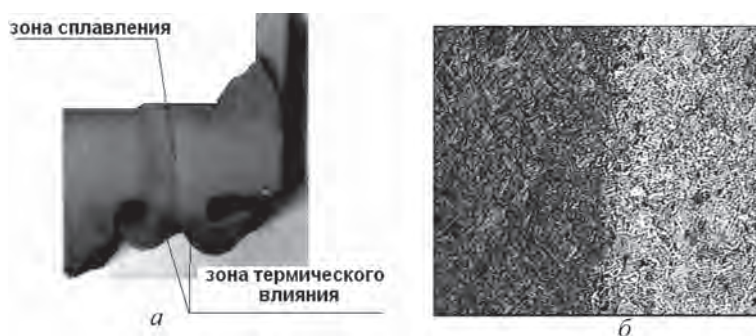


Рис. 3. Сварной шов при сварке трением: а – внешний вид шлифа; б – микроструктура зоны сплавления. ×125

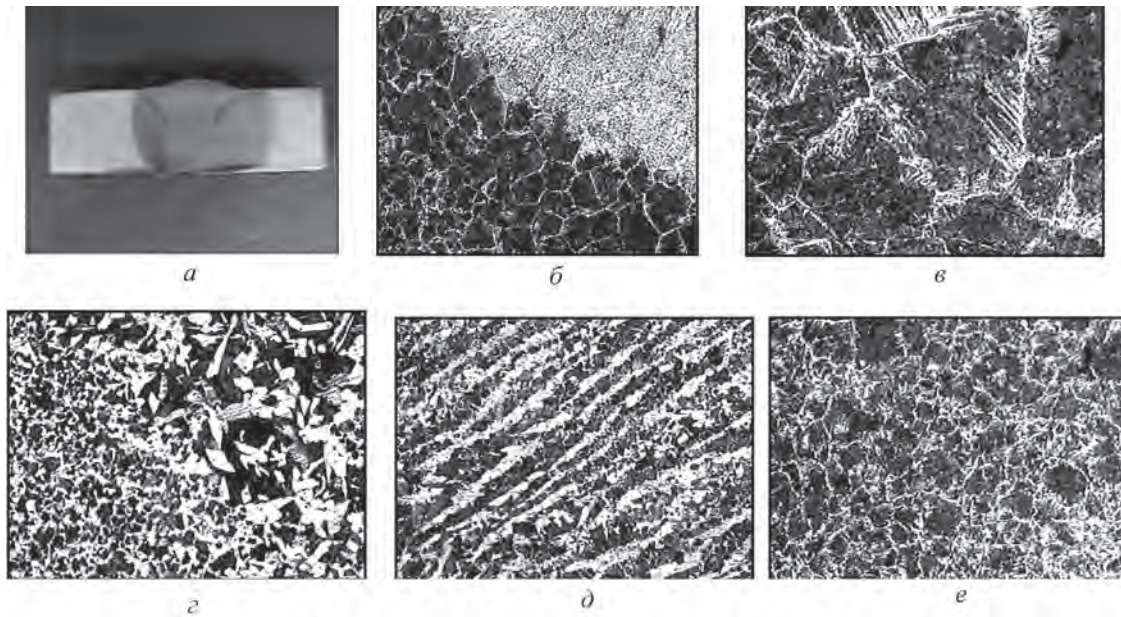


Рис. 4. Макрошлиф (а) и микроструктура (б–е) сварного шва, полученного ручной электродуговой сваркой; б – зона сплавления; в – зона перегрева; г – зона нормализации; д – структура основного металла цапфы; е – структура основного металла кожуха картера

На рис. 3 показан общий вид сварного шва сварки трением до термообработки. На рисунке отчетливо видны зона сплавления и зоны термического влияния. Микроструктура в зоне сварки детали цапфа – троостосорбит крупноигльчатого строения. Твердость – 367,7–385,8HV (~ 37,5–39,3HRC). Микроструктура в зоне сварки детали кожух картера – бейнит + феррит. Твердость – 250,3–257,5 HV (22,3–23,5HRC).

Для сварного шва, полученного ручной электродуговой сваркой (рис. 4, а), характерны следующие зоны: сварной шов, зона сплавления металлов, зона термического воздействия и зона основного металла. Металл шва имеет структуру литого металла с характерным для него дендритным строением. В зоне сплавления (рис. 4, б) отчетливо виден переход от литой структуры шва к участку со структурой перегрева. Участок перегрева (рис. 4, в) характеризуется крупнозернистой видманштеттовой структурой, а участок нормализации (рис. 4, г) имеет мелкозернистую структуру. Далее следует участок неполной

нормализации, который характеризует переход околошовной зоны к основному металлу. Основной металл, не попавший в зону высоких температур, не претерпел структурных изменений. Микроструктура основного металла цапфы (рис. 4, д) – перлит пластинчатый + феррит, зерно № 7, 8 (ГОСТ 5639-82), наблюдаются крупные участки с зерном № 5, 4, с элементами видманштетта. Микроструктура основного металла кожуха (рис. 4, е) – перлит пластинчатый + феррит, зерно № 7,8 (ГОСТ 5639-82), полосчатость 2-го балла (ГОСТ 5640-68).

Из сварных швов картера изготавливали образцы, которые подвергали термообработке как в печи, так и индукционным методом. Образцы для печного отпуска загружали в печь СН-3, время нагрева – 30 мин, что соответствовало скорости нагрева 0,46–0,50 °C/с. Образцы с отжигом ТВЧ вырезали из деталей, отпущенных ТВЧ на различную температуру. Скорость нагрева при этом составляла 5–7 °C/с. Температура отпуска была 300, 400, 500, 600, 700, 800 °C. На рис. 5, а, б показаны ми-

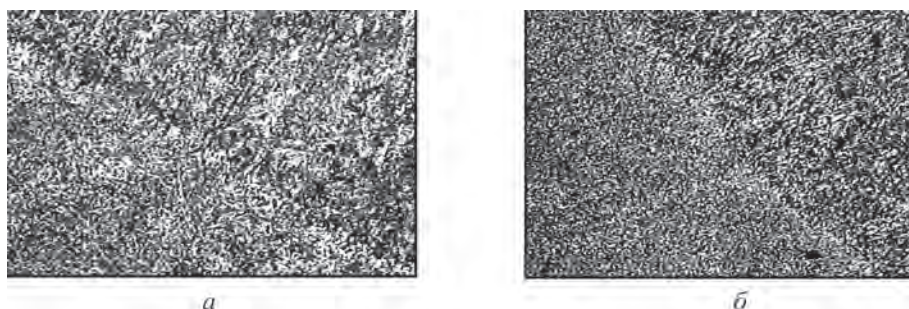


Рис. 5. Микроструктура зон сплавления сварного шва, отпущенного на температуру 800 °C: а – печной отпуск; б – отпуск ТВЧ. ×500

Таблица 1. Результаты замеров отклонения цапфы от оси картера до и после нормализации ТВЧ кольцевого сварного шва

Номер картера	Номер цапфы	Замеры биения цапфы по точкам								Среднее отклонение
		1		2		3		4		
		до т/о	после т/о	до т/о	после т/о	до т/о	после т/о	до т/о	после т/о	
0	0	-0,5	-0,3	+1,2	+0,8	-0,9	-1,1	+0,7	+0,8	0,15
	00	+0,4	+0,3	+1,4	+1,2	-1,2	-1,5	+0,1	-0,1	0,15
1	1	+0,6	-0,7	+1,1	+1,2	-1,0	-0,8	-0,3	+1,0	0,15
	11	-0,6	+0,6	+1,1	+1,3	-0,9	-0,9	+1,0	-0,3	0,1
2	2	+1,0	+0,7	-1,1	-1,2	+1,6	+1,3	-0,8	-0,6	0,2
	22	-0,1	-0,1	-0,6	-0,3	+0,7	-0,3	+0,3	+0,4	0,3
3	3	-0,1	-0,4	-0,6	-0,5	+1,0	+1,0	+0,4	+0,9	0,2
	33	-0,5	-0,2	-0,2	-0,1	+0,6	+0,5	+0,9	0,0	0,3
4	4	+0,4	+0,5	-1,2	-1,3	+1,5	+1,7	-0,2	-0,1	0,1
	44	-0,3	-0,6	-0,7	-1,0	+1,2	+1,3	+0,5	+0,8	0,2
5	5	+1,3	+0,6	+1,0	+1,0	-0,7	-0,8	-1,0	-1,2	0,25
	55	-0,4	-0,6	+1,1	+1,2	-0,8	-0,8	+0,8	+1,0	0,1
6	6	+1,0	+1,4	+0,8	+0,7	-0,5	-0,4	-0,8	-0,9	0,2
	66	-0,4	-0,5	+0,7	+0,7	-0,1	-0,3	+0,7	+0,9	0,1
7	77	+1,1	+1,2	-0,9	-1,3	+1,1	+1,0	-1,0	-1,0	0,1
	777	-0,1	0,0	-0,8	-1,2	+1,3	+0,7	+0,2	+0,3	0,1
8	8	-0,1	-0,3	-1,3	-0,9	+1,6	+1,3	+0,3	+0,6	0,3
	88	-0,1	-0,2	-1,3	-1,1	+1,5	+0,7	0,0	0,0	0,25
9	99	+0,4	+0,4	-1,0	-1,1	+1,6	+1,5	0,0	0,0	0,0
	999	+0,9	+0,9	-0,2	-0,3	+0,4	+0,5	-0,6	-0,7	0,1

кросструктуры зон сплавления сварного шва, отпущенного в печи и с нагревом ТВЧ на температуру 800 °С.

В результате проведенных работ установлено, что для получения равнозначной структуры и прочностных свойств сварного шва по сечению скорость индукционного нагрева должна составлять от 5 до 8 °С/с. Меньшие скорости нагрева приводят к большим потерям энергии за счет передачи тепла в слои металла, не требующие термического воздействия, увеличение скоростей нагрева приводит к неравномерности нагрева сварного шва и околшовной зоны и, как следствие, неравномерности в структуре и твердости по сечению сварного шва.

С целью установления влияния режимов индукционного нагрева сварных швов картера на величину деформаций были проведены замеры биения цапфы по четырем точкам (см. рис. 2) при различных скоростях нагрева.

В табл. 1 приведены результаты проведенных измерений биения цапфы по четырем контрольным точкам до и после отжига кольцевых швов. Для картеров № 7,9 скорость нагрева составляла около 4,9–6,4 °С/с, для картеров № 1, 2, 4, 5, 6 – от 6,0 до 7,8, а для картеров № 2 и 8 – 8,3–10,9 °С/с.

*Второй этап.* Были выполнены работы по оптимизации режимов индукционной закалки цап-

фы картера, обеспечивающие высокие прочностные свойства при минимальном короблении детали. Закалке подвергали цилиндрическую поверхность цапфы с выходом на галтель с одной стороны и наружную шлицевую поверхность с другой стороны. Для выхода зоны закалки на галтель был применен одновитковой индуктор с тремя магнитопроводами в виде вставок, расположенных под углом 120° по окружности. Это позволило перераспределить электромагнитное поле и обеспечить при вращении детали равномерный прогрев цилиндрической части и галтели. На рис. 6 показан процесс нагрева галтели цапфы картера.



Рис. 6. Нагрев галтели картера цапфы на установке фирмы «Termamacchina»

Экспериментальным путем были определены значения мощности, подводимой в индуктор, расстояние  $h$  между индуктором и торцом цапфы, скорость перемещения индукционной головки и расход охлаждающей жидкости. Схема закалки показана на рис. 7.

На рис. 8 показано расположение зоны закалки в районе галтели при различных значениях величины  $h$ . При расстоянии  $h$  в интервале 15–18 мм зона закалки ТВЧ располагается равномерно по цилиндрической части с выходом на галтель. При увеличении расстояния  $h$  более 20 мм образуется

разрыв зоны ТВЧ, при этом увеличивается глубина зоны закалки на цилиндрической части. Детали с таким расположением зоны закалки ТВЧ обладают низкой долговечностью, при этом очаг разрушения находится по месту разрыва зоны упрочненного слоя.

Измерение геометрических размеров показало, что при обеспечении зоны закалки на цапфе (рис. 8, а) достигается минимальное коробление упрочняемых поверхностей. На рис. 9 приведена диаграмма изменения параметра биения по различным поверхностям закаленной цапфы, полу-



Рис. 7. Схема закалки цапфы картера заднего моста непрерывно-последовательным способом при движении индуктора относительно детали

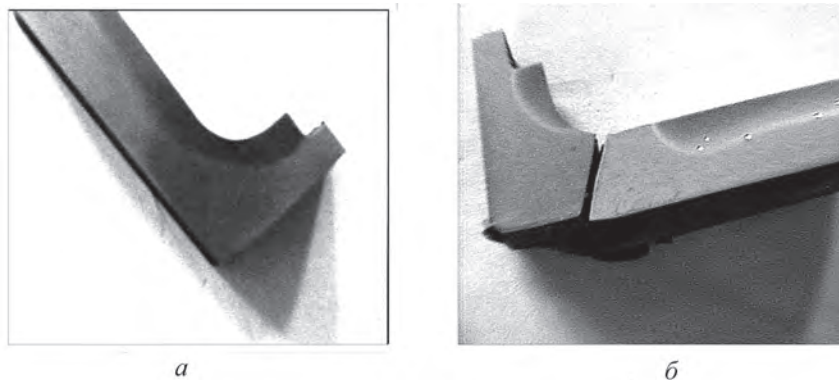


Рис. 8. Расположение зоны закалки ТВЧ на цапфе картера заднего моста автомобиля МАЗ: а – правильно; б – неправильно

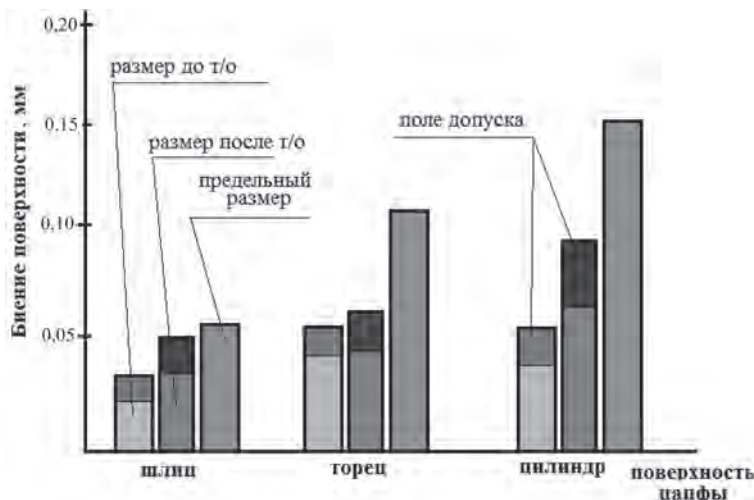


Рис. 9. Диаграмма изменения радиального биения различных поверхностей цапфы после закалки ТВЧ

ченная после изготовления и измерения опытной партии деталей в количестве 180 шт.

Важным элементом ведущего заднего моста мобильной машины является полуось, которая служит длинномерным тяжелонагруженным элементом несущей конструкции, испытывающим при эксплуатации значительные крутящие усилия. Полуоси ведущего моста автомобилей МАЗ всех типоразмеров изготавливают из сталей 40Х, 40ХН, 35ХГСА и подвергают поверхностной индукционной закалке непрерывно-последовательным способом на специальной установке. Важнейшее условие ее длительной эксплуатации – формирование значительной глубины закаленного слоя при минимальных короблениях. Для выполнения закалки полуосей используется установка ТВЧ, обеспечивающая закалку деталей длиной до 1200 мм. Для обеспечения глубины закалки ТВЧ в интервале 5,0–8,0 мм (для различных моделей) по всей длине и твердостью поверхности 50–54 HRC была разработана конструкция двухвиткового индуктора с дифференцированной шириной индукционных витков и регулируемым расположением спрейерного устройства. Нагрев выполняют двухвитковым индуктором от преобразователя частоты ППЧВ-250/2400 мощностью 250 кВт и частотой 2400 Гц. В процессе работы на установке строго соблюда-

ют отлаженные режимы закалки и охлаждения. При этом режимы нагрева контролируют по электрическим параметрам преобразователя, а режим охлаждения – по давлению и температуре охлаждающей воды, подаваемой на спрейер. На расстоянии 10–15 мм от обоих концов выдерживают переходные зоны с заниженной твердостью и толщиной закаленного слоя, что обеспечивает отсутствие закалочных трещин. Для этого была разработана и смонтирована на станке специальная электросхема, позволяющая обеспечивать переходные зоны ТВЧ.

Фотография процесса закалки полуосей и схема работы индуктора для закалки полуосей с регулируемым спрейером представлены на рис. 10.

При прохождении детали через индуктор на первом витке за счет уменьшения его высоты  $h_1$  увеличивается плотность электромагнитного поля, что позволяет быстро нагреть поверхность детали. При прохождении вдоль второго витка, имеющего большую высоту  $h_2$  и соответственно меньшую плотность электромагнитного поля, происходит поддержание температуры и распространение нагрева в глубину детали. За счет регулирования расстояния  $L_1$  обеспечивается выравнивание температуры по сечению детали в глубину, обеспечивая, тем самым, попадание нагретого металла в зону

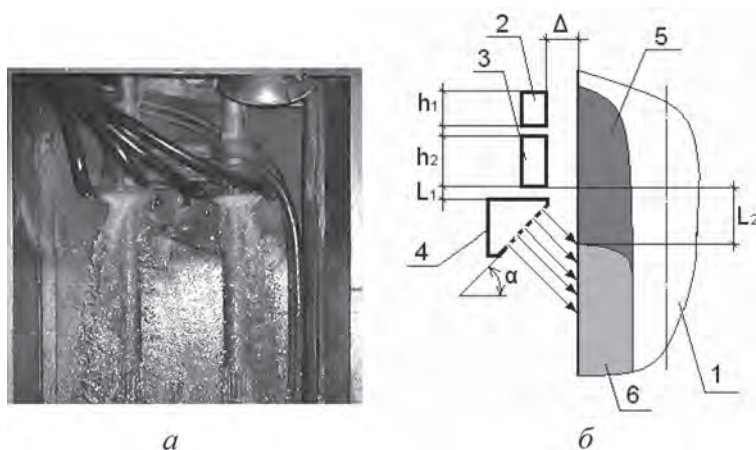


Рис. 10. Закалка полуосей автомобилей МАЗ: а – индуктор во время закалки на установке ТВЧ; б – схема закалки ( $L_1$  – закаливаемая деталь; 2 – первый виток индуктора; 3 – второй виток индуктора; 4 – спрейер; 5 – зона нагрева; 6 – зона закалки)

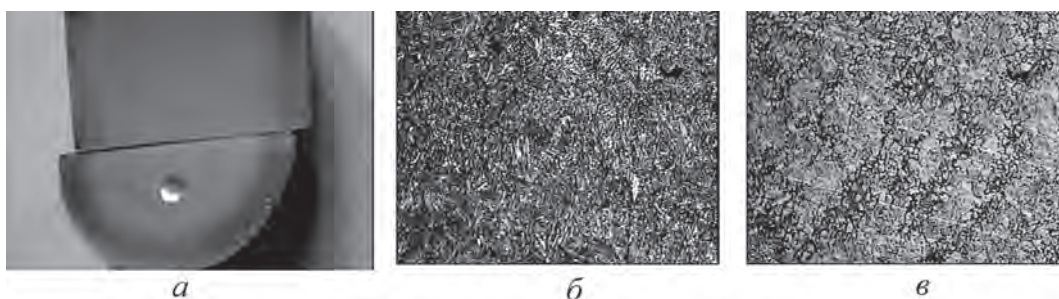


Рис. 11. Внешний вид зоны закалки (а) и микроструктура закаленного слоя на полуоси; на поверхности, мартенсит среднегольчатый (б); на глубине 6 мм, троостомартенсит (в).  $\times 500$

спрейерного охлаждения с достижением закалочной температуры как на поверхности детали, так и максимально по глубине нагретого слоя. Соответственно можно установить зависимость величины  $L_2$  (расстояние от нижнего края второго витка до начала зоны действия спрейерного охлаждения) от величин  $L_1$ , зазора между индуктором и деталью  $\Delta$  и угла  $\alpha$  подачи закалочной среды из спрейера:

$$L_2 = L_1 + \Delta / \operatorname{tg} \alpha.$$

Применение подобной схемы нагрева и охлаждения позволяет получить закаленный слой глубиной до 10 мм без перегрева на поверхности детали.

На рис. 11 показаны расположение зоны закали на полуоси и микроструктура закаленного слоя на поверхности и глубине 6 мм.

**Индукционный нагрев деталей подвески.** Целый ряд длинномерных деталей подвески и заготовок для их изготовления подвергают индукционному нагреву для различных операций – нормализации, гибки, высадки и др. [2].

Автоматическая линия МА-105 (в составе индукционной установки и гибочного комплекса) изготовления вала стабилизатора длиной 3 м и диаметром 45–55 мм из сталей 40Х, 40ХН, 30ХГС под гибку внедрена в кузнечном цехе ОАО «МАЗ». Установка запитана от сети высокочастотного питания, состоящей из преобразователей частоты ППЧВ 500/2400, включенных на параллельную работу. Наличие сменных индукторов позволяет производить нагрев целого ряда заготовок вала стабилизатора под гибку для всех семейств автомобилей МАЗ. На рис. 12 приведена технологическая схема работы установки. Нагрев осуществляют одновременно в двух одинаковых индукторах для двух обрабатываемых участков длиной до 500 мм на концах заготовки. Каждый индуктор запитан от отдельного понижающего трансформатора. Заготовка последовательно передается автоматическим манипулятором с позиции загрузки 1 на позицию предварительного подогрева 2 и далее на позицию окончательного нагрева 3 и позицию гибки 4.

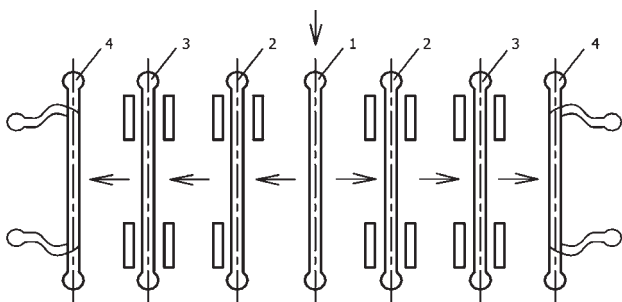


Рис. 12. Схема работы установки МА-105: 1 – позиция загрузки; 2 – позиция предварительного подогрева; 3 – позиция окончательного нагрева; 4 – позиция гибки

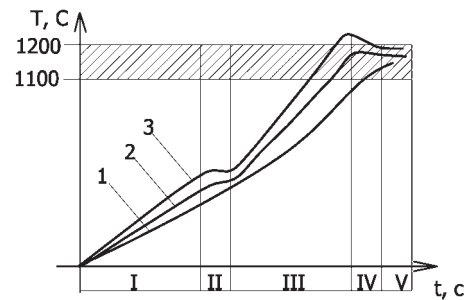


Рис. 13. Распределение температур по различным точкам при нагреве вала стабилизатора: 1 – температура на поверхности детали; 2 – на глубине 10 мм; 3 – на глубине 20 мм; I – предварительный нагрев; II – перенос детали; III – окончательный нагрев; IV – перенос детали; V – гибка детали

За счет оптимального выбора скоростей нагрева и с учетом выравнивания температуры по сечению заготовки на операциях переноса удалось достигнуть распределения температуры нагрева заготовки по сечению, обеспечивающей высокое качество операции пластической деформации. На рис. 13 показано распределение температуры по точкам 1, 2 и 3 в процессе нагрева заготовки.

На позиции предварительного нагрева I разность температуры на поверхности и в центре заготовки достигает до 150–180 °С, которая при переносе заготовки на позицию окончательного нагрева II выравнивается (перепад температур уменьшается до 80 °С). Аналогичное распределение температуры наблюдается и на позиции окончательного нагрева III. На позиции гибки V температура заготовки составляет 1100–1200 °С с перепадом температуры по сечению заготовки не более 100 °С, что обеспечивает высокое качество операции гибки.

На Минском рессорном заводе внедрены две установки для индукционного нагрева заготовок под прокатку переменного профиля малолистовой рессоры. Длина нагреваемых под прокатку заготовок и соответственно рабочего окна индукторов составляет от 1600 до 2750 мм, высота рабочего окна – 25–65 мм. Применение продольного электромагнитного поля для нагрева заготовок позволило не только сократить площадь индукционного нагрева, но и обеспечить точность нагрева  $\pm 20^\circ\text{C}$  по длине. Это достигается за счет последовательного и параллельно-последовательного соединения витков.

**Индукционный нагрев полуфабрикатов несущих конструкций.** В кузнечном производстве ОАО «МАЗ» внедрена установка для нормализации индукционного нагрева пруткового металла, используемого для изготовления высокопрочного крепежа для деталей несущих конструкций [3, 4]. Одним из дефектов такого материала является на-

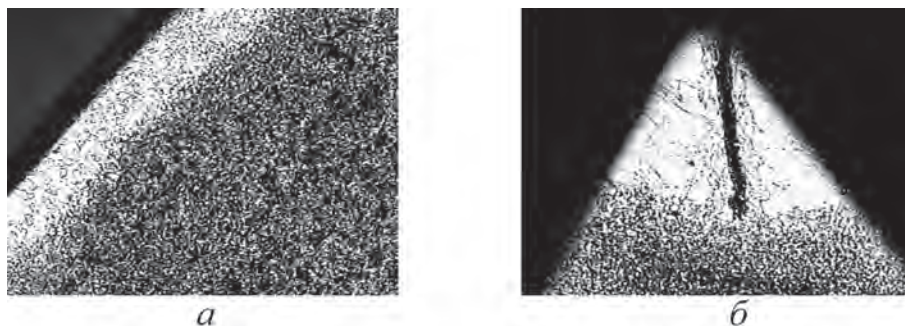


Рис. 14. Микроструктура металла с обезуглероженными слоями: *а* – на поверхности проката; *б* – на гребне резьбы болта.  $\times 125$

личие полного или частичного обезуглероживания поверхности. На рис. 14, *а* показана микроструктура поверхности металла с подобным дефектом. В процессе накатки резьбы резьбонакатными роликами формообразование профиля резьбы происходит за счет поверхностного слоя. При большой глубине обезуглероженный слой может распространяться практически на всю высоту резьбы, тем самым, снижая ее прочностные свойства. Наличие дефектов резьбы в виде складок (рис. 14, *б*) дополнительно ухудшает ее прочность.

С целью устранения подобного дефекта была разработана и внедрена технология и оборудование индукционной термообработки пруткового металла. На рис. 15 показана схема работы линии, а на рис. 16 – линия в работе. Заготовки укладывают на стеллаж загрузки *4* и поочередно механизмом загрузки *2* подают в приводные ролики *б*, которые проталкивают заготовки через четырехсекционный индуктор *1* с заданной скоростью, в котором на первых двух секциях производится быстрый нагрев до определенной температуры, а на последующих – поддержание заданной температуры для равномерного прогрева по всему сечению заготовки.

На выходе из индуктора заготовка захватывается приводными роликами *5*, извлекается из индуктора и механизмом выгрузки укладывается на позицию складирования *3*, где производится медленное остывание заготовок. Линия запитана от машинного преобразователя ППЧВ-250/2400 мощностью 250 кВт и частотой 2400 Гц. Мощность

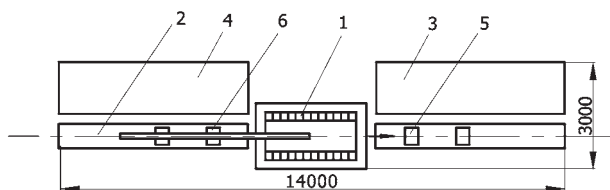


Рис. 15. Схема работы линии термообработки с нагревом ТВЧ пруткового металла: *1* – индуктор; *2* – механизм загрузки; *3* – стеллаж складирования; *4* – стеллаж загрузки; *5, 6* – приводные ролики

250 кВт позволяет получить требуемую производительность, а частота 2400 Гц является оптимальной для диаметров 18–32 мм, которая дает возможность обеспечить нагрев без перегрева поверхности и равномерного проникновения токов высокой частоты на всю глубину сечения прутка.

В процессе разработки и внедрения технологии были исследованы зависимости скоростей нагрева на получаемую структуру и твердость для различных марок сталей, распределение твердости по сечению, влияние калибровки на структуры, величину зерна и распределение твердости. Изучено влияние ТВЧ на образование обезуглероженных слоев при различных скоростях и параметрах нагрева. На рис. 17 показано распределение твердости по сечению прутка диаметром 16 мм для стали 40Х (рис. 17, *а*) и стали 35 (рис. 17, *б*) при разных скоростях движения прутка через индуктор при отжиге ТВЧ.

Таким образом, установлено, что применение индукционной термообработки позволяет оптимизировать структуру и распределение твердости по сечению металла, исключить образование обезуглероженного слоя и обеспечить требуемый класс прочности крепежного изделия для деталей несущих конструкций мобильных машин.

Одним из ответственных узлов автобусов и троллейбусов МАЗ, во многом определяющим долго-

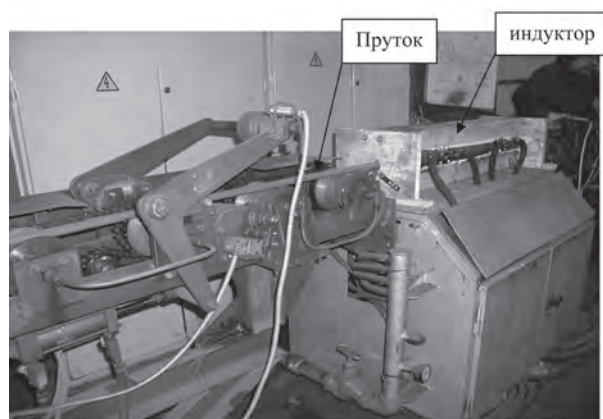


Рис. 16. Линия нормализации пруткового металла в работе



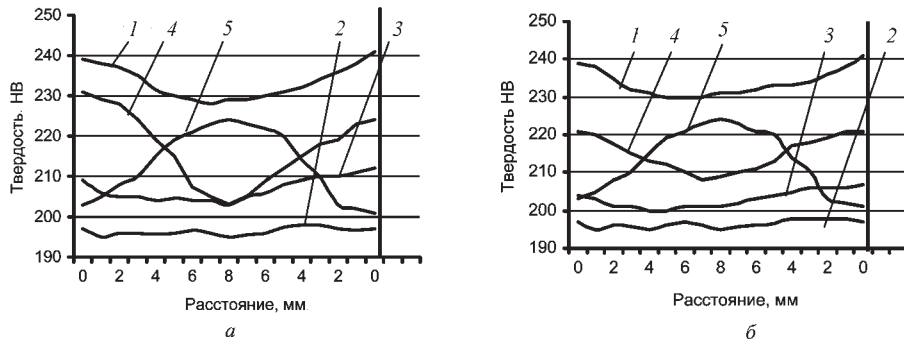


Рис. 17. Распределение твердости по сечению прутка диаметром 16 мм: а – для стали 40Х; б – для стали 35: 1 – в состоянии поставки; 2 – отжиг в печи; 3 – отжиг ТВЧ при скорости 64 мм/с; 4 – отжиг ТВЧ при скорости 40 мм/с; 5 – отжиг ТВЧ при скорости 80 мм/с

вечность изделия в целом, является его сварной каркас, изготавливаемый из профильных электросварных прямошовных труб, получаемых способом холодной деформации по ГОСТ 13663-86. Данные трубы изготавливают из горячекатаной рулонной полосы стали 20 пс по ГОСТ 1050-88 в нетермообработанном состоянии. В процессе изготовления металл рулонной полосы подвергают значительным холодным пластическим деформациям, что приводит к образованию наклепа. Поэтому изделия с такой структурой обладают низкими пластичными свойствами, что в процессе эксплуатации приводит к разрушению. На рис. 18 показан общий вид сварного фрагмента каркаса автобуса с характерным дефектом.

Для полноценного и эффективного использования данного материала необходимо существенное повышение его пластичности, которое возможно при термической обработке [5, 6]. В данном случае оптимальной термической обработкой является нормализация. Наиболее эффективный тип нагрева в этом случае – локальный индукционный нагрев движущейся заготовки поперечным электромагнитным полем. Выполнены исследования по выбору оптимальных параметров индукционной термообработки – частота нагрева, удельная мощность нагрева, конечная температура, равномерность нагрева и время нагрева.

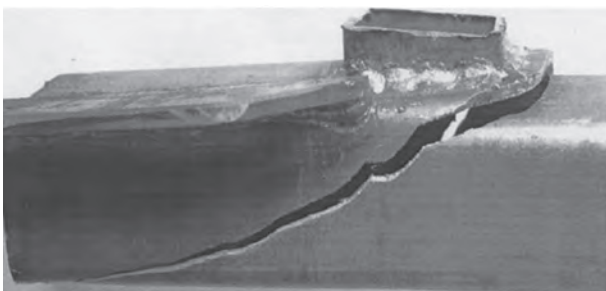


Рис. 18. Внешний вид фрагмента каркаса автобуса МАЗ со сквозной трещиной

Частота индукционного нагрева определяется по формуле

$$\Delta_k \approx \frac{0,5}{\sqrt{f}} i ,$$

где  $\Delta_k$  – горячая глубина проникновения тока;  $f$  – частота.

Принимая глубину проникновения тока, равную толщине стенки заготовки 2,6–3,0 мм, получаем значение  $f = 22 - 25$  кГц. Наиболее близкой частотой из выпускаемого промышленного оборудования является частота 10 кГц. С помощью программного продукта ThermoSim 2 выполнено моделирование распределения температурных полей по длине нагреваемой заготовки при различных значениях зоны электромагнитного поля. В зависимости от конструкции индуцирующего провода для нагрева заготовки может быть применен один и более индукционных витков. На рис. 19 показано распределение температуры нагрева по длине заготовки при различном количестве витков индуцирующего провода. Граничным условием данного расчета является температура нагрева поверхности 780–800°C.

Из рисунка видно, что при одном витке индуцирующего провода количество и время нахождения материала заготовки в зоне температур струк-

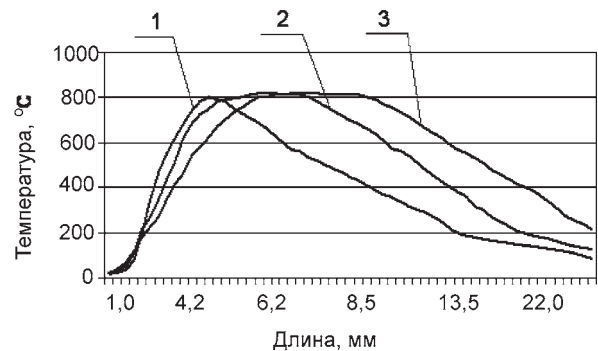


Рис. 19. Распределение температуры по длине заготовки при различных значениях зоны электромагнитного поля: 1 – один виток индуцирующего провода шириной 14 мм; 2 – два витка; 3 – три витка



Рис. 20. Распределение твердости на трубе до и после индукционной термообработки

турных превращений недостаточно. Для совершенства структурных превращений и обеспечения равномерного нагрева по сечению количество индукционных витков должно быть не менее трех.

Установлены закономерности изменения твердости на стенках труб и по местугиба до и после термообработки (рис. 20). Как видно из рисунка, термообработка профильной трубы позволяет снизить твердость как в зонах максимальной пластической деформации (погибу), так и твердость стенок трубы, что, в конечном итоге, дает возможность повысить пластичность.

Вторым положительным фактором данной термообработки является исправление структуры,

заключающееся в устранении структурно-свободного цементита. На рис. 21 представлена микроструктура прямоугольной трубы размером 60×40×3 мм из стали 20 пс по ГОСТ 1050-88, которая была подвергнута индукционной термообработке на различную температуру.

Как видно из рисунка, нагрев до температуры 780–800 °С позволяет устранить структурно-свободный цементит, что также повышает пластичность материала.

Была проведена серия испытаний механических свойств труб различного размера до и после индукционной термообработки. Испытаниям на растяжение подвергали отрезки труб размером 60×40×3 мм, длиной 350 мм после различных режимов термической обработки. В табл. 2 приведены результаты испытаний труб размером 80×40×3 мм.

Установлено, что индукционная термообработка движущейся трубной заготовки прямоугольного сечения на частоте 10 кГц при практически одинаковом пределе прочности приводит к увеличению пластичности (относительное удлинение) в 6,3 раза при температуре нагрева 850–920 °С и в 2,9 раза – при температуре нагрева 540–580 °С.

Комплекс проведенных работ позволил разработать и внедрить технологию и оборудование для

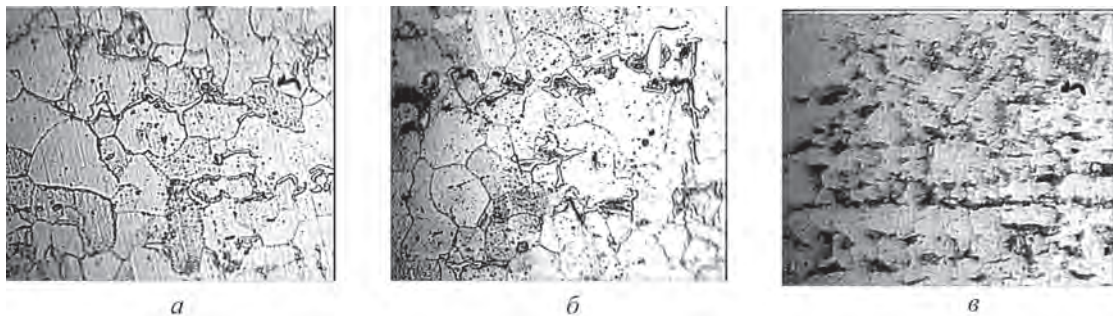


Рис. 21. Микроструктура трубы после термообработки на различную температуру: а – нагрев 650–680 °С (Ф + П пластинчатый, зерно № 8, 7, ГОСТ 5639-82, структурно-свободный цементит, 3-й балл, ГОСТ 5640-68); б – 720–750 °С (Ф + П пластинчатый, зерно № 8, 7, ГОСТ 5639-82, структурно-свободный цементит, 3–2-й балл, ГОСТ 5640-68); в – 780–800 °С (Ф + П пластинчатый, зерно № 8, 7, ГОСТ 5639-82)

Т а б л и ц а 2. Результаты испытаний на растяжение образцов трубы размером 80×40×3 мм по различным режимам термообработки

Номер трубы	Вид термообработки	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
1	Без термообработки	505	11,1
2	Индукционный нагрев 850–920 °С	515	33,0
3		510	37,9
4	Индукционный нагрев 680–730 °С	495	33,9
5		495	32,3
6	Индукционный нагрев 540–580 °С	525	33,0
7		530	32,5



Рис. 22. Общий вид линии термообработки стальных прямоугольных труб

индукционной локальной термообработки данного материала. Линия для термообработки труб для каркасов автобусов внедрена в 2009 г. на ОАО «МАЗ» (рис. 22). Нагрев осуществляется от тиристорного преобразователя ТВЧ мощностью 200 кВт и частотой 10 кГц

### Вывод

Применение индукционного нагрева с различными типами электромагнитного поля, обеспечивающими регулируемый нагрев, позволяет оптимизировать и повысить конструкционную прочность деталей и полуфабрикатов несущих систем мобильных машин.

### Литература

1. Гурченко П. С., Михлюк А. И., Летуневич В. Е. Оборудование и технологии индукционной обработки длинномерных изделий на РУП «МАЗ». Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Мн., 2008.*
2. Гурченко П. С., Демин М. И., Михлюк А. И. Индукционный нагрев в литейном и кузнечном производствах ПО «БелавтоМАЗ» // *Литье и металлургия. 2002. № 2. С. 103–109.*
3. Гурченко П. С., Михлюк А. И., Дыбаль И. В. Индукционный нагрев для термообработки проката при изготовлении болтов // *Грузовик. 2003. № 6. С. 33–35.*
4. Михлюк А. И., Гурченко П. С. Влияние индукционного нагрева на структурообразование при рекристаллизационном отжиге круглого стального проката // *Литье и металлургия. 2004. № 1. С. 47–51.*
5. Михлюк А. И., Гурченко П. С. Индукционный нагрев – способ повышения свойств стального трубного проката // *Автомобильная промышленность. 2006. № 6. С. 35–39.*
6. Гурченко П. С., Михлюк А. И. Повышение эксплуатационных свойств холодотянутых сварных труб. Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Мн., 2005.*