



The new approach for technology of volumetric – superficial hardening of gear details of the back axle made of steel lowered harden ability is offered. This approach consisting in formation of intense – hardened condition on all surface of a detail.

А. И. МИХЛЮК, ОАО «Минский автомобильный завод»

УДК 536.46

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБЪЕМНО–ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Введение. Метод объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) был разработан для специальных так называемых сталей пониженной прокаливаемости в 60-х годах прошлого столетия известным советским специалистом в области индукционной термообработки К. З. Шепеляковским [1]. Сущность его состоит в том, что упрочняемое изделие из стали ПП после поверхностного индукционного нагрева подвергается высокоинтенсивному закалочному охлаждению. На поверхности на глубину прокаливаемости образуется мартенситная структура, а слои, нагретые выше точки A_{c3} , но расположенные глубже закаляются на структуру троостита, сорбита и перлита. При этом за счет пониженного содержания примесей в стали, суммарное содержание которых не должно превышать 0,5%, ограничивалась глубина прокаливаемости и закаленный слой формировался по контуру зубчатой поверхности. Внешний вид зоны прогрева и зоны упрочнения в этом случае показан на рис. 1.

Метод нашел практическое применение, однако до настоящего времени не рассматривался в качестве равнозначного с химико-термической об-

работкой по прочностным свойствам и долговечности термообрабатываемого изделия, так как имел ряд недостатков.

Во-первых, ограничения глубины прогрева металла зубчатым венцом и некоторым слоем металла под ним, чтобы обеспечить прокаливаемость зубчатой поверхности, оставляли значительную часть металла детали вообще без какого-либо термического упрочнения.

Во-вторых, содержание углерода в сталях пониженной прокаливаемости и способы ее охлаждения после локального нагрева приводили к повышенному короблению зубчатой поверхности.

В-третьих, нагрев зубчатых поверхностей путем радиального распространения температурных полей по сечению детали приводил к неравномерности нагрева зубчатой поверхности и, как следствие, увеличению глубины прокаливаемости и неравномерной твердости.

На ОАО «МАЗ» предложен, теоретически обоснован и реализован новый подход к объемно-поверхностной закалке тяжелонагруженных зубчатых деталей мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости [2, 3]. Суть данного подхода заключается в повышении конструкционной прочности изделия путем формирования напряженно-упрочненного состояния по всем поверхностям детали. На рис. 2 показана схема предложенного подхода. В отличие от ранее применяемых схем нагрева деталей, имеющих зубчатые поверхности, когда индукционному нагреву подвергается слой металла, несколько превышающий глубину прокаливаемости, в данном случае производится сквозной индукционный нагрев детали с последующим ее охлаждением по всем поверхностям, включая и внутренние. Это позволяет получить закаленный слой по контуру детали и

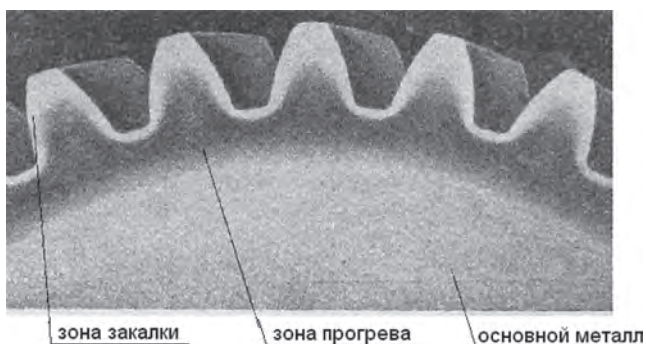


Рис. 1. Внешний вид распределения зон нагрева и закалки для зубчатых поверхностей из стали ПП после индукционного поверхностного нагрева

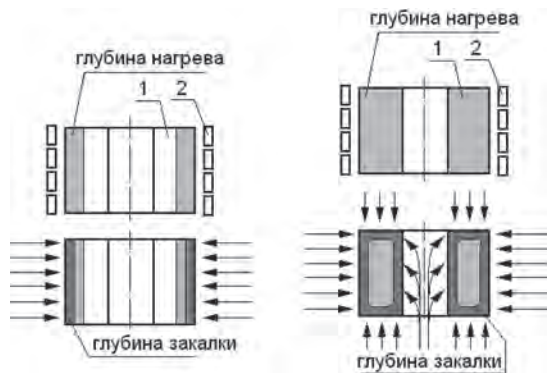


Рис. 2. Схема контурного объемно-поверхностного упрочнения изделия из стали ПП: 1 – нагреваемая деталь; 2 – индуктор ТВЧ

создать изделие с высокой конструкционной прочностью.

Исходя из предложенной схемы упрочнения, можно спрогнозировать, как сформируется напряженно-упрочненное состояние изделия. На рис. 3 показано распределение твердости при различных видах термообработки. Для поверхностной

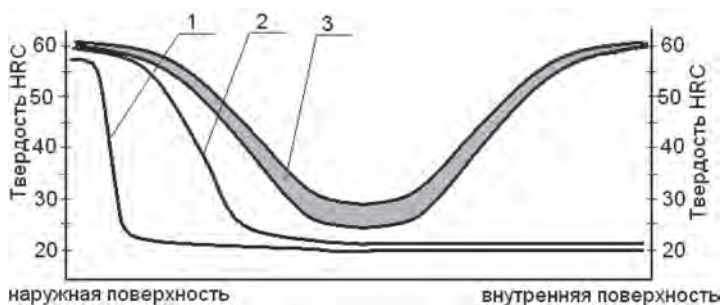


Рис. 3. Распределение твердости при различных типах упрочнения: 1 – поверхностная закалка ТВЧ; 2 – объемно-поверхностная закалка при локальном нагреве; 3 – объемно-поверхностная закалка при сквозном нагреве

закалки характерно наличие четко выраженной зоны закалки ТВЧ и резкое падение твердости от закаленного поверхностного слоя к основному металлу (кривая 1). Для объемно-поверхностной закалки при локальном нагреве (кривая 2) характерен более плавный переход твердости к основному металлу, но также имеется зона основного металла с исходной твердостью. Для объемно-поверхностной закалки при сквозном индукционном нагреве (кривая 3) упрочнению подвергается вся поверхность изделия с плавным переходом к основному металлу, причем твердость сердцевины металла может изменяться в определенных пределах в зависимости от размеров изделия, равномерности и температуры нагрева и интенсивности охлаждения. В отличие от закалки ТВЧ или объемно-поверхностной закалки при локальном нагреве при данной контурной объемно-поверхностной закалке достигается упрочнение по всем

поверхностям изделия с плавным снижением твердости к основному металлу. При этом в отличие от химико-термической обработки твердость сердцевины можно сформировать в зависимости от назначения и степени нагруженности изделия.

Применение подобного типа упрочнения позволяет получить в упрочненном изделии три зоны: зону закалки с твердостью 57 HRC min, микроструктура которой представляет собой мартенсит мелко- или среднеугольчатый, зону промежуточных превращений с микроструктурой троостомартенсита, троостита или сорбита, твердость которой плавно снижается с 57 до 32–30 HRC, и зону металла, прошедшего структурные превращения с ускоренным охлаждением с микроструктурой сорбита и перлита пластинчатого, твердость которой составляет от 34 до 26 ед. HRC. На рис. 4 показано наличие трех описанных выше зон упрочнения на детали, имеющей наружную зубчатую и внутреннюю шлицевую поверхность после закалочного охлаждения по контуру детали.

При получении подобного распределения упрочненных слоев на поверхности детали данный метод упрочнения можно рассматривать как альтернативу широко применяемой на машиностроительных предприятиях химико-термической обработки, в первую очередь цементации. При этом при равных, а по некоторым показателям более высоких прочностных и эксплуатационных свойствах, обеспечивает значительный экономический эффект за счет трех составляющих: материала, технологии и оборудования.

На рис. 5 показана стоимость стали 60ПП, по данным интернет источников по состоянию на 2009 г. в сравнении с некоторыми сталями, ис-

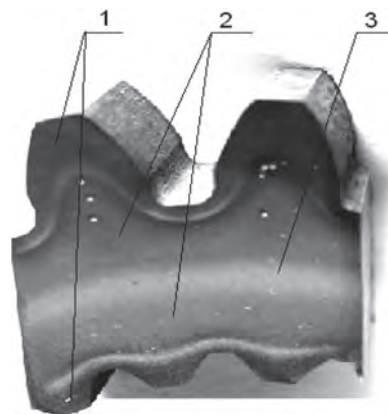


Рис. 4. Распределение зон упрочнения при контурной объемно-поверхностной закалке детали из стали ПП: 1 – зона закалки; 2 – зона промежуточных превращений; 3 – зона основного металла

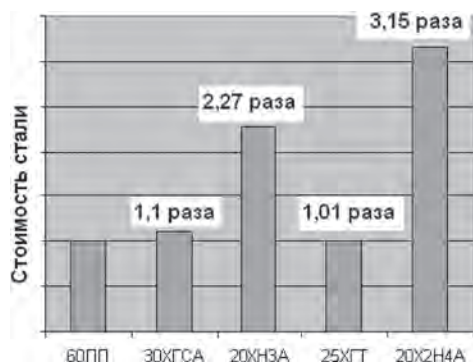


Рис. 5. Сравнительная стоимость стали 60ПП со сталями, применяемыми при ХТО

пользуемыми при ХТО. Как видно из рисунка, особенно значительная разница в стоимости для никелесодержащих сталей, которые применяются для широкого спектра высоконагруженных деталей, например шестерен трансмиссии в автомобилестроении.

Контурная объемно-поверхностная закалка сталей пониженной прокаливаемости по сравнению с химико-термической обработкой обеспечивает значительный экономический эффект по энергоресурсам. Цикл термообработки сокращается с десятков часов до нескольких минут, затраты электроэнергии уменьшаются в 10–12 раз, исключаются потребление природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов, выбросы вредных испарений, дыма, сажи, тепла и газов в окружающую среду.

Стоимость оборудования для ОПЗ сравнима со стоимостью индукционной установки, что в 8–12 раз дешевле оборудования для ХТО. При этом занимаемая площадь оборудования в несколько раз меньше.

Процесс равномерного сквозного индукционного нагрева зубчатых деталей. Для выполнения контурной объемно-поверхностной закалки необходимо выполнение двух условий: равномерный сквозной индукционный нагрев и интенсивное со скоростями более 1000 °С/с равномерное закалочное охлаждение. Зубчатые детали имеют

сложную форму и обеспечить их равномерный нагрев традиционным способом путем равномерного распространения температуры в радиальном направлении от поверхности к сердцевине детали представляется сложным. Было предложено и исследовано влияние нескольких типов электромагнитных полей на распределение температуры по поверхности и сечению детали. На рис. 6 показаны схемы сквозного индукционного нагрева различных зубчатых деталей.

Детали с цилиндрическими зубчатыми поверхностями подвергали сквозному индукционному нагреву в продольном электромагнитном поле с дифференцированным распределением плотности по длине. При равномерной плотности электромагнитного поля для данного типа заготовок происходит подстуживание заготовки по ее торцам за счет влияния краевых эффектов, что приводит к недогреву. Закалка деталей, нагретых в электромагнитном поле такого типа, приводит к неравномерной твердости и различной микроструктуре по разным сечениям зуба и детали. На рис. 7, а показана микроструктура закаленного ОПЗ слоя по контуру зуба – мартенсит мелкоигольчатый, твердость ОПЗ слоя по контуру зуба – 61–59 HRC, на глубине 1,0–1,5 мм – 58–57 HRC, на рис 7, б – троостомартенсит + участки феррита, твердость ОПЗ слоя по контуру – 51–52 HRC, на глубине 1,5 мм – 49–50 HRC.

Для обеспечения равномерности нагрева было произведено перераспределение плотности электромагнитного поля за счет изменения ширины индукционных витков индуктора.

На рис. 8, а показан процесс сквозного индукционного нагрева цилиндрической зубчатой детали в многовитковом индукторе с дифференцированным распределением электромагнитного поля, а на рис. 8, б – распределение температуры по поверхности детали после завершения процесса нагрева в подобном электромагнитном поле, измеренное с помощью стационарного оптического пирометра «Raytek».

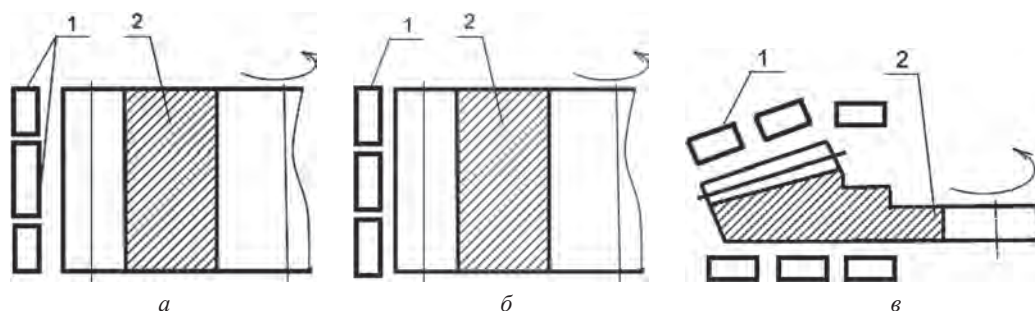


Рис. 6. Схемы индукционного нагрева зубчатых деталей различными типами электромагнитного поля: а – продольное неравномерное; б – продольное равномерное; в – асимметричное; 1 – индукционный виток индуктора; 2 – нагреваемая деталь

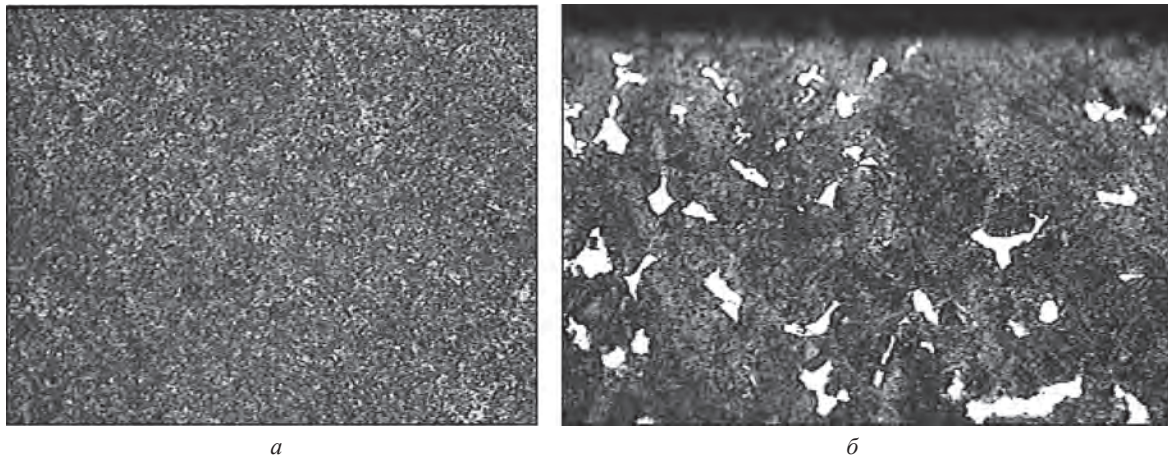


Рис. 7. Микроструктура ОПЗ слоя по контуру зуба детали шестерня ведущая 5440-2405028 после нагрева в продольном равномерном электромагнитном поле: *a* – на расстоянии 30 мм от торца детали; *б* – на расстоянии 5 мм от торца детали

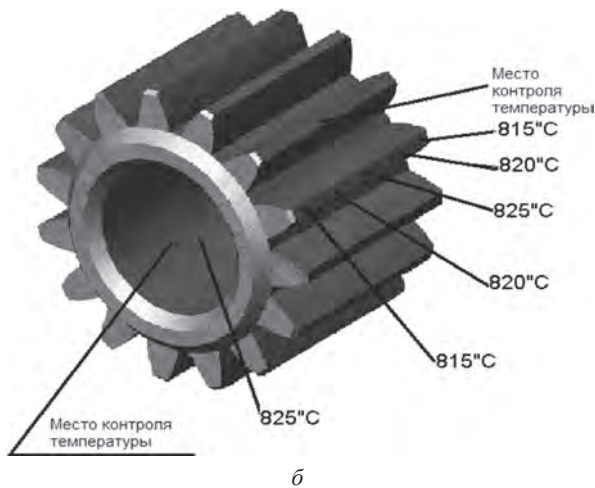
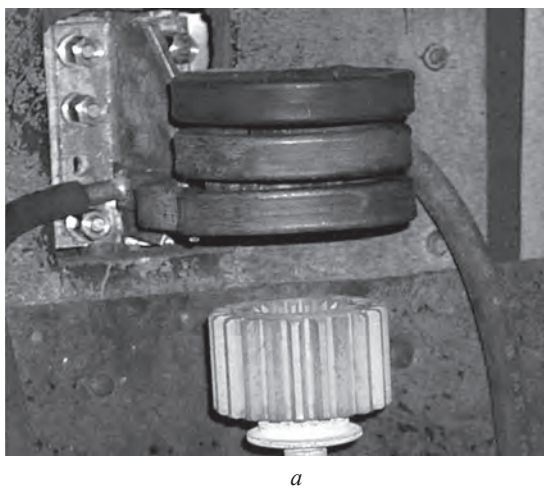


Рис. 8. Процесс сквозного индукционного нагрева цилиндрических зубчатых деталей: *a* – процесс нагрева; *б* – распределение температуры по поверхности

Распределение температуры по сечению определяли с помощью хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных на впадине зуба, теле зуба, внутренней поверхности детали при различных значениях удельной мощности нагрева от 6 до 18 кВт/кг.

На рис. 9, *a* показано изменение температуры нагрева деталей сателлит и шестерня колесной передачи по трем точкам измерения (впадине зуба, теле зуба, внутренней шлицевой поверхности) при удельной мощности нагрева 10 кВт/кг. Скорость нагрева при этом для детали сателлит составляла для тела зуба 4,4 °С/с, для впадины зуба – 4,13, для внутренней поверхности – 4,08 °С/с. Такое малое различие в скоростях нагрева для впадины и внутренней поверхности объясняется малой толщиной детали в данном сечении, что за счет теплопроводности практически уравнивает скорости нагрева по данным измеряемым точкам. При этом максимальная разница в температуре нагрева по измеряемым точкам составила не более 30–40 °С.

Скорость нагрева для детали шестерня колесной передачи составляла для тела зуба 4,48 °С/с, для впадины зуба – 4,13, для внутреннего шлица – 3,85 °С/с. Расстояние между впадиной зуба и внутренним шлицем для шестерни 5336-2405028 в 3,4 раза больше, чем для сателлита, поэтому разница в нагреве этих поверхностей видна довольно четко. Разница в температуре нагрева по изме-



Рис. 9. Изменение температуры нагрева по трем точкам измерения для шестерен колесной передачи заднего моста: 1 – впадина зуба; 2 – тело зуба; 3 – внутренняя поверхность; *a* – сателлит; *б* – шестерня

Т а б л и ц а 1. Разница в температурах нагрева тела шестерни и зуба шестерни при различных значениях удельной мощности нагрева зуба

Температура нагрева зуба шестерни, °С		300	400	500	600	700	800
		Максимальная разница в температуре нагрева зуба и тела шестерни, °С					
Удельная мощность нагрева, кВт/кг	6	30	35	45	50	45	35
	10	60	65	75	90	70	45
	14	80	130	150	200	195	140
	18	95	175	240	370	310	230

ряемым точкам на разных стадиях составляла до 95 °С.

В табл. 1 приведены данные измерения температуры нагрева шестерни 5336-2405028 при различных значениях удельной мощности нагрева.

Вторым типом электромагнитного поля, которое было применено для нагрева деталей, является асимметричное электромагнитное поле. Внешний вид нагрева деталей в таком поле показан на рис. 10. В электромагнитном поле нагревали детали сложной формы, такие, как крестовина дифференциала, конические шестерни главной передачи и сателлиты межколесного дифференциала. Отличительной особенностью этого типа нагрева является высокая частота импульсов воздействия электромагнитного поля на нагреваемую деталь, что связано с двумя факторами – геометрическими размерами асимметричного индуктора и частоты вращения детали в индукторе. При этом достигаемая разница в температуре нагрева для данного типа электромагнитного поля составляла 15–25 °С как по поверхности, так и по сечению детали.

Таким образом, для обеспечения равномерности с точностью ± 15 °С сквозного нагрева деталей с различными типами зубчатых поверхностей под последующую объемно-поверхностную закалку по контуру требуется соблюдение двух условий:

1) правильный выбор типа индукционного нагрева, определяемый типом электромагнитного

поля, который должен обеспечивать равномерность распределения температуры по поверхности детали ±20 °С;

2) выбор величины удельной мощности нагрева, которая не должна превышать значений нагрева не более 6 кВт/кг, что соответствует скоростям нагрева 3–5 °С/с и обеспечивает градиент конечной температуры по сечению ≤20 °С.

Процесс равномерного закалочного охлаждения по контуру при объемно-поверхностной закалке детали из стали пониженной прокаливаемости. Был разработан и опробован способ интенсивного закалочного охлаждения зубчатых деталей ведущих мостов мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости, заключающийся в комбинированном применении двух типов охлаждения поверхности. Суть разработанного способа заключается в том, что наружные зубчатые поверхности детали охлаждаются спрейерным типом охлаждения, а внутренние поверхности простой формы – охлаждением потоком движущейся закалочной среды. Схема предложенного способа охлаждения показана на рис. 11. Закаливается изделие 1 после сквозного индукционного нагрева помещается в закалочную камеру, где производится интенсивное закалочное охлаждение для наружных и торцовых поверхностей через систему спрейеров 2, а для внутренних поверхностей – путем быстродвижущегося пото-



Рис. 10. Сквозной индукционный нагрев крестовина межколесного дифференциала ведущего моста из стали 60ПП в асимметричном электромагнитном поле

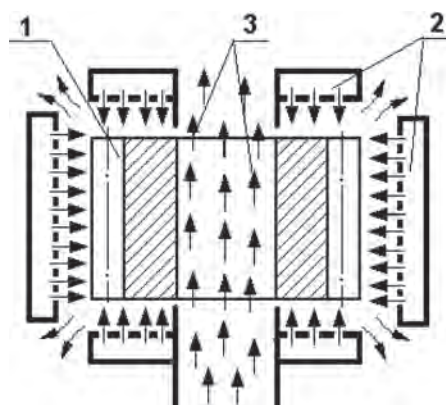


Рис. 11. Схема комбинированного закалочного охлаждения по контуру зубчатых деталей из сталей пониженной прокаливаемости: 1 – закаливаемая деталь; 2 – спрейерная система; 3 – охлаждающий поток

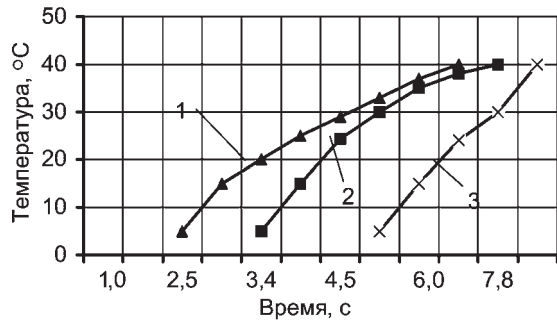


Рис. 12. Зависимость оптимальной длительности периода закалочного охлаждения от температуры и давления закалочной оборотной воды в подающей системе при давлении среды: 1 – 1 кгс/см²; 2 – 2; 3 – 5 кгс/см²

ка 3 охлаждающей среды вдоль закаливаемой поверхности. При этом за счет применения в конструкции закалочной камеры специальных разделительных стенок достигается разделение потоков спрейерного охлаждения и охлаждения потоком.

Дальнейшие работы по отладке режимов закалочного охлаждения проводили по двум направлениям: путем закалки опытных партий деталей на специальном закалочном приспособлении и методом математического моделирования.

При упрочнении опытных партий для закалочного охлаждения использовали техническую воду оборотной системы Минского автозавода. В процессе исследования давление в оборотной системе изменяли от 1 до 5 кгс/см², температуру – от 5 до 30 °C (рис. 12). При меньшем давлении охлаждающей воды не обеспечивается непрерывности потока, подаваемого на закаливаемую поверхность, а для получения давления более 5 кгс/см² необходимо применение специальных насосов высокого давления. Применяемые интервалы изменения температуры закалочной воды выбирали

из данных изменения температуры закалочной воды в системе оборотного водоснабжения.

Расход закалочной воды 20–30 л/с выбирали из расчета суммарного сечения калиброванных отверстий закалочного приспособления для данных конкретных деталей. При оптимальных режимах охлаждения достигается равномерная твердость поверхности 60–62 HRC с мартенситной структурой закалочного слоя. Деформация делительного диаметра зубьев при этом не превышает 0,02 мм, закалочные трещины отсутствуют. Закалка шестерен, по традиционному режиму обеспечивая твердость 45–64 HRC для различных сочетаний температуры и давления закалочной воды, приводит к образованию мягких трооститных пятен (для теплой воды малого давления) или закалочных трещин (для холодной воды большого давления).

Для определения оптимальной длительности охлаждения выполнены работы по математическому моделированию процессов охлаждения деталей из стали 60ПП с помощью программного продукта «ThermoSim2» [4]. Для деталей межколесного дифференциала сателлит и полуосевая шестерня было смоделировано охлаждение при различной длительности 1, 5 и 8 с. При этом рассчитывали распределение температуры по сечению детали. На рис. 13 показано графическое изображение распределения температуры по сечению детали при длительности охлаждения 1 и 5 с.

Из анализа полученных результатов установлено, что длительность охлаждения для данной детали из стали 60ПП должна составлять не менее 5 с, так как при длительности охлаждения 5 с внутри детали находятся слои металла при значи-

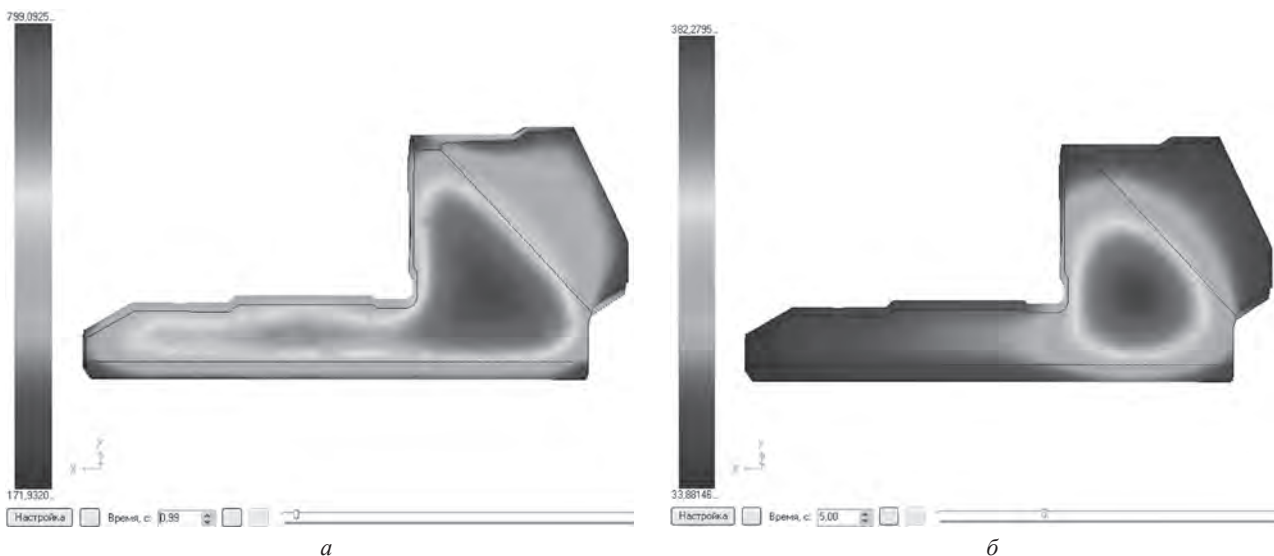


Рис. 13. Результаты математического моделирования деталей из стали 60ПП при интенсивном охлаждении длительностью 1 с (а); 5 с (б)

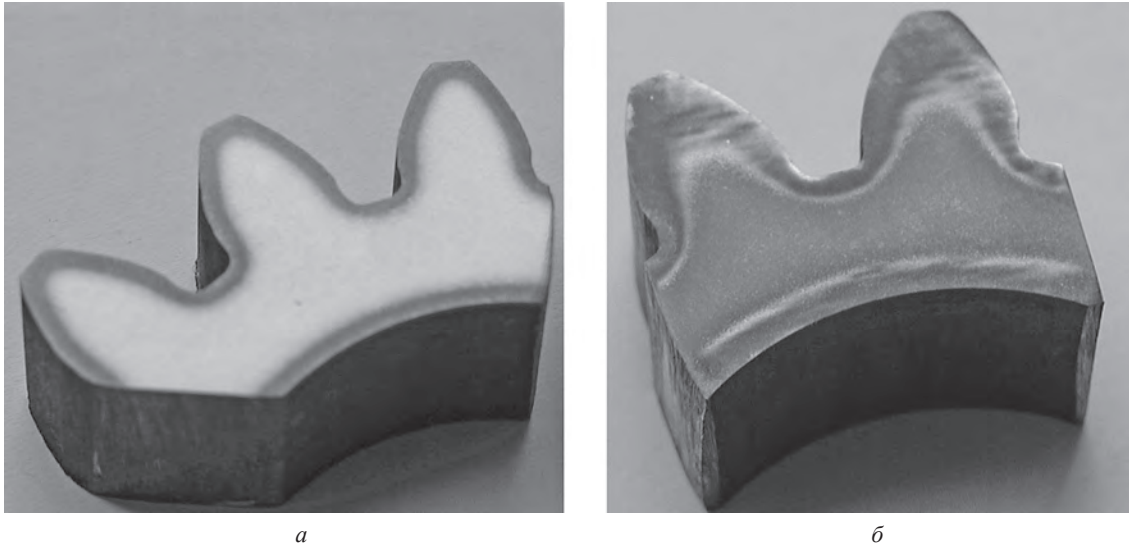


Рис. 14. Фотографии макрошлифов наружной прямозубой шестерни: *а* – из стали 20ХН3А, прошедшей операцию цементации; *б* – из стали 60ПП с ОПЗ по контуру

тельной температуре. Прекращение охлаждения приведет к самоотпуску детали на значительную температуру, что неизбежно снизит твердость поверхности. Кроме того, в процессе охлаждения данной детали формируется высокий градиент температуры по сечению, составляющий величину от 629 °С при 1 с охлаждения и 350 °С при 5 с. Это неизбежно приведет к повышенному короблению детали в процессе закалки.

Таким образом, предложен и исследован способ комбинированного интенсивного закалочного

охлаждения зубчатых деталей ведущих мостов мобильных машин из сталей пониженной прокаливаемости, обеспечивающий достижения равномерной твердости по контуру детали в интервале 60–62 HRC.

Результаты контурной объемно-поверхностной закалки различных зубчатых деталей заднего моста автомобиля из стали пониженной прокаливаемости. Была проведена контурная объемно-поверхностная закалка опытных партий цилиндрических и конических зубчатых колес и выполнено

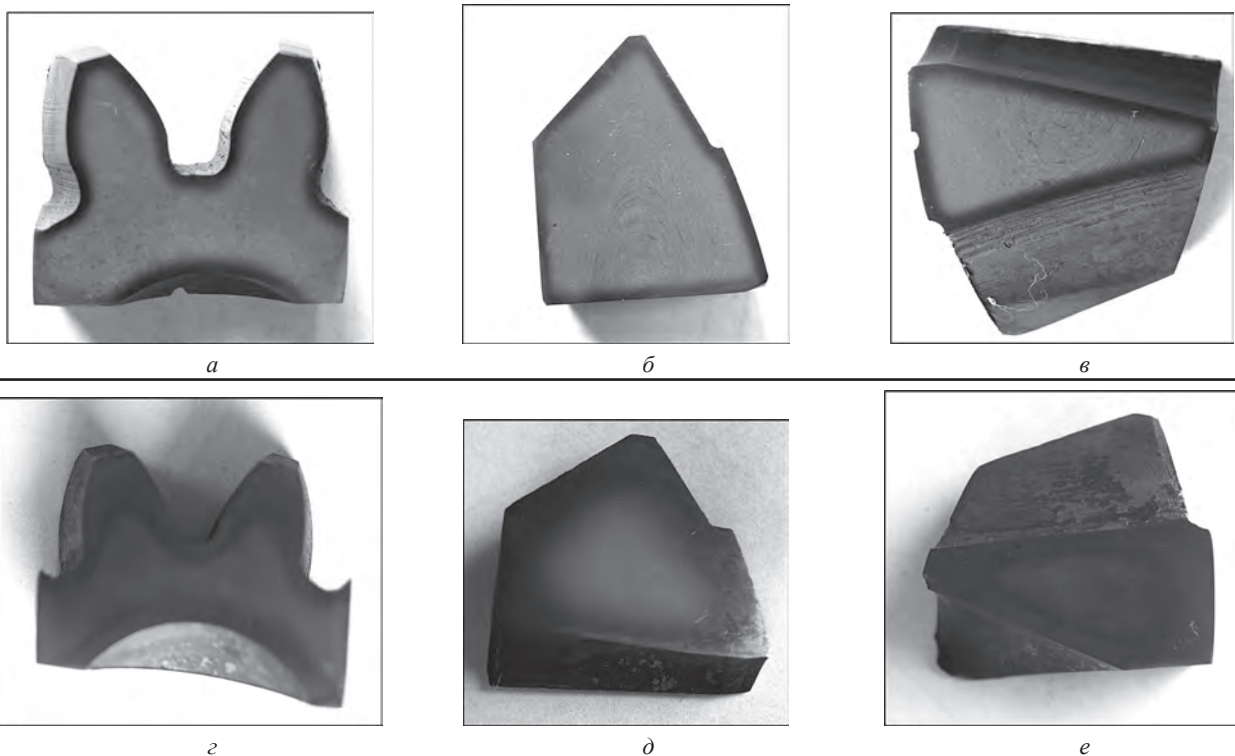


Рис. 15. Распределение зон упрочнения на детали сателлит межколесного дифференциала: *а, б, в* – сталь 20ХН3А и цементация; *г, д, е* – сталь 60ПП и ОПЗ: *а, г* – поперечное сечение шестерни по середине высоты зуба; *б, д* – продольное сечение вершины зуба; *в, е* – продольное сечение через впадину зуба

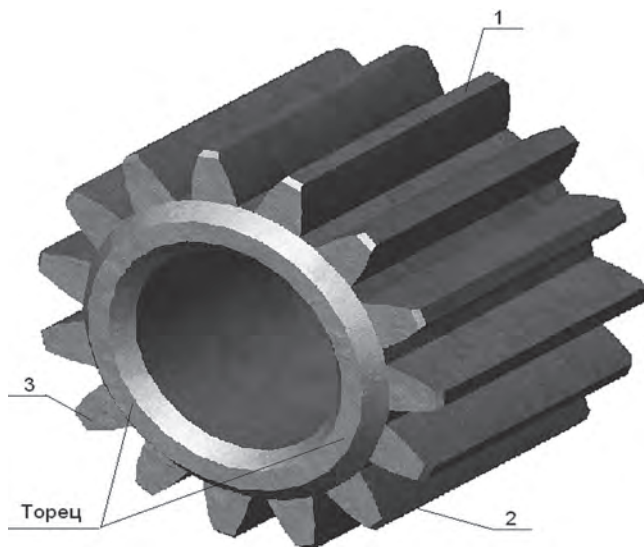


Рис. 16. Места замера твердости на детали сателлит 5551-2405035, изготовленного из стали 60ПП и упрочненного ОПЗ: 1 – зуб № 1; 2 – зуб № 2; 3 – зуб № 3

сравнение распределения упрочненных слоев по различным сечениям данных деталей с деталями из стали 20ХН3А, прошедшими цементацию [5].

На рис. 14 показаны фотографии макрошлифов детали сателлит с наружной зубчатой поверхностью, упрочненных химико-термической и контурной объемно-поверхностной закалкой.

На рис. 15 показан внешний вид распределения зоны упрочнения на конических прямозубых шестернях межколесного дифференциала заднего моста автомобиля МАЗ по различным сечениям.

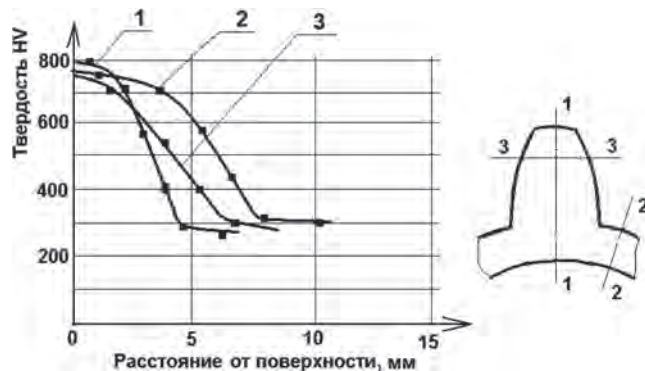


Рис. 17. Распределение твердости по сечениям детали сателлит 5336-2405035: 1 – от вершины зуба до внутреннего диаметра; 2 – от впадины зубчатой поверхности до внутреннего диаметра; 3 – перпендикулярно боковой поверхности зуба на расстоянии 2/3 от диаметра впадин

Таблица 2. Результаты измерения твердости на детали сателлит 5551-2405035, изготовленного из стали 60ПП и упрочненного ОПЗ

Номер точки замера	Твердость поверхности в месте измерения HRC			
	зуб № 1	зуб № 2	зуб № 3	торец
1	59,0	59,0	58,5	Верхний 60–61
2	59,0	60,0	59,0	
3	60,5	61,0	59,0	
4	60,0	61,0	59,0	
5	60,5	61,0	59,0	
6	60,5	60,0	59,5	Нижний 59–60
7	59,0	60,5	59,5	
8	60,0	60,5	59,0	
9	59,0	59,0	59,0	
10	58,0	59,0	58,5	

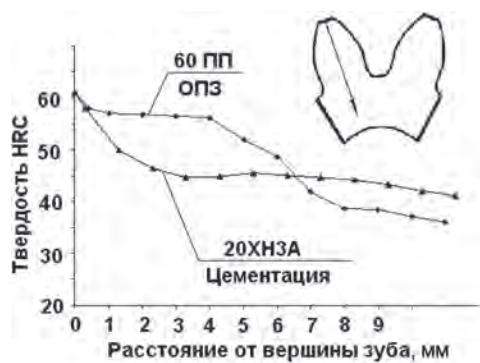


Рис. 18. Распределение твердости по различным сечениям конической прямозубой зубчатой поверхности: а – по вершине зуба; б – по впадине зуба; в – по боковой поверхности на расстоянии 2/3 от вершины

Было установлено, что интенсивное охлаждение деталей из стали 60ПП по контуру обеспечивает равномерное распределение твердости в интервале 58–64 HRC по всей поверхности сложнопрофильных деталей. Контурная объемно-поверхностная закалка деталей из стали 60ПП обеспечивает глубину закалочного слоя в 2,0–2,5 раза большую, чем при химико-термической обработке стали 20ХН3А как на зубчатых поверхностях, так и по всей поверхности детали. Работы проводили на детали сателлит колесной передачи. Были проведены измерения твердости на трех зубьях, находящихся по отношению друг к другу под углом 120° и по торцу детали сателлит из стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки и отпуска на температуру 180°C . На рис. 16 показана схема измерений твердости, а результаты измерений приведены в табл. 2.

Распределение твердости по различным сечениям проводили на цилиндрических и конических зубчатых деталях.

На рис. 17 показано распределение твердости от поверхности по глубине для различных сечений детали сателлит и ее зубчатой поверхности.

Из рисунка видно, что в зависимости от условий охлаждения глубина упрочненного слоя раз-

лична, но твердость поверхности по всем измеряемым сечениям находится в интервале > 60 HRC.

На конических зубчатых колесах проведено сравнительное исследование распределения твердости по различным сечениям детали (рис. 18). Установлено, что для конических прямозубых поверхностей деталей, изготовленных из стали 60ПП и упрочненных ОПЗ по контуру, в сравнении с аналогичными деталями из стали 20ХН3А, подвергнутыми цементации, твердость поверхности равнозначна, а для некоторых более высокая. Глубина упрочненного слоя составляет от 2 до 4 мм, что в 1,5–2,0 раза больше, а твердость сердцевины на 2–6 ед. HRC ниже.

Выводы

Разработан и исследован способ контурной объемно-поверхностной закалки зубчатых деталей из сталей пониженной прокаливаемости, обеспечивающий при нагреве с удельными мощностями не более 10 кВт/кг и скоростями нагрева $4\text{--}8^\circ\text{C}/\text{с}$ и градиентом конечной температуры по сечению $\leq 20^\circ\text{C}$ при равномерном дозированном с точностью до $\pm 0,1$ с охлаждении со скоростями $\geq 1000^\circ\text{C}/\text{с}$, твердость поверхности по всему контуру детали в интервале 58–63 HRC.

Литература

1. Ш е п е л я к о в с к и й К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972.
2. Пат. РБ № 2374. Устройство для управляемой закалки деталей из сталей пониженной прокаливаемости / В. А. Гуринович, А. П. Ракомсин, П. С. Гурченко и др.
3. Пат. РБ № 7184. Способ управляемого закалочного охлаждения стальных изделий / А. П. Ракомсин, И. С. Гаухштейн, П. С. Гурченко, А. И. Михлюк.
4. Л е м з и к о в А. В., И в а н о в Д. Г. Программный комплекс «THERMOSIM 2» для моделирования процессов индукционной закалки // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении». Мн., 19–21 ноября 2008 г.
5. М и х л ю к А. И. Перспективы применения сталей пониженной прокаливаемости для изготовления деталей автомобилей МАЗ // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 65–72.