



*It is shown that high-speed heating of profiled electric-welded pipes made of a steel 20PS allows to optimize mechanical characteristics and to raise constructional durability of bearing structures of automobile equipment.*

А. И. МИХЛЮК, ОАО «Минский автомобильный завод»,  
И. И. ВЕГЕРА, О. А. ВЕГЕРА, ГНУ ФТИ НАН Беларуси

УДК 536.46

## УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

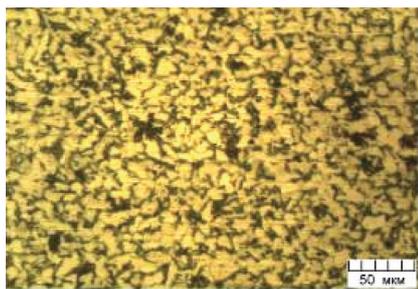
**Введение.** Несущие конструкции современных мобильных машин – это ключевые системы данного изделия, определяющие его надежность и долговечность. Детали и применяемые материалы данных систем имеют одну общую закономерность – их длина всегда превышает 1 м и достигает значений до 12–16 м. Современные требования как зарубежных, а в последнее время и отечественных потребителей по ресурсу до выхода из строя для данных систем достигают до 1 млн. км пробега. Без разработки и применения упрочняющих технологий достичь таких требований невозможно.

**Состояние исходного материала.** Одним из ответственных узлов автобусов и троллейбусов МАЗ является его сварной каркас. Он изготавливается из профилированных электросварных прямошовных труб, получаемых методом холодного деформирования и сварки листовой заготовки стали 20пс по ГОСТ 13663 – 86. В процессе изготовления труб металл подвергается значительным пластическим деформациям, что приводит к появлению остаточных напряжений. В исходном состоя-

нии сталь 20пс имеет феррито-перлитную структуру со средним размером зерен 10–20 мкм и включениями структурно-свободного цементита (рис. 1, а). В зоне изгиба профилированной трубы за счет деформации зерна феррита имеют вытянутую форму (рис. 1, б).

Формирование такой структуры приводит к увеличению микротвердости от 206 HV<sup>200</sup>, характерной для основного металла, до 232 HV<sup>200</sup> в зоне изгиба.

Другим проблемным местом профилированной электросварной прямошовной трубы является зона сварного шва, где также наблюдаются существенные изменения свойств и структуры основного металла. Так, в результате нагрева до температур плавления и последующего охлаждения в зоне оплавления и термического влияния происходят процессы фазовой перекристаллизации с фиксированием метастабильных структур (рис. 2). В переходной зоне термического влияния и в зоне сварного шва в связи с ростом температуры и ускоренным охлаждением в стали 20пс формируется



а



б

Рис. 1. Исходная микроструктура профилированной трубы из стали 20 пс: а – боковая грань, микротвердость 206HV<sup>200</sup>; б – зона изгиба, микротвердость 232HV<sup>200</sup>

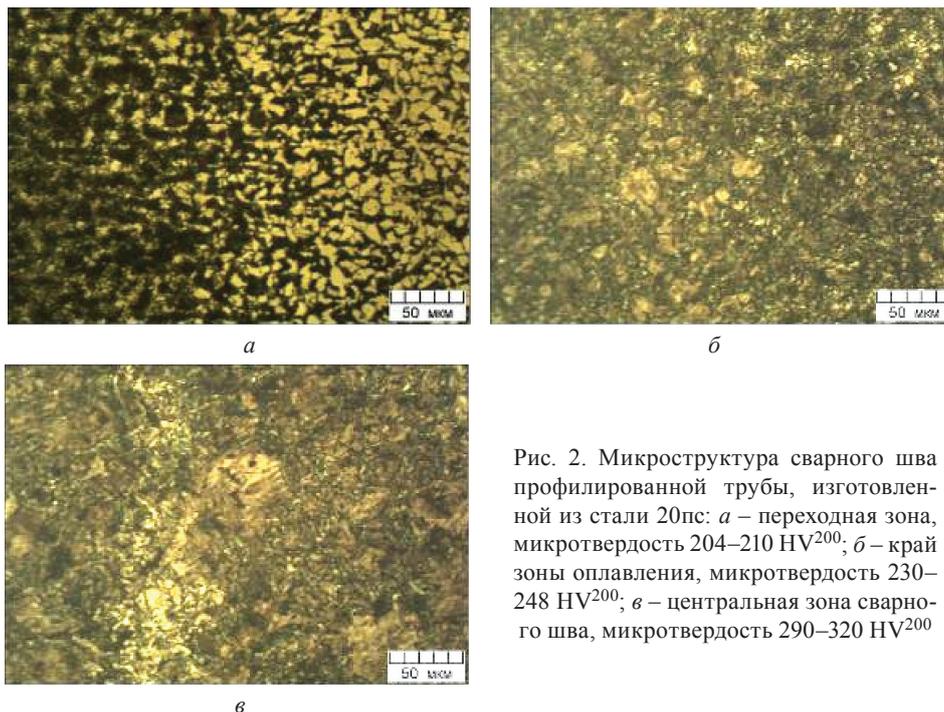


Рис. 2. Микроструктура сварного шва профилированной трубы, изготовленной из стали 20пс: *а* – переходная зона, микротвердость 204–210 HV<sup>200</sup>; *б* – край зоны оплавления, микротвердость 230–248 HV<sup>200</sup>; *в* – центральная зона сварного шва, микротвердость 290–320 HV<sup>200</sup>

сорбитообразная структура (рис. 2, *б*), а в центральной зоне шва появляются участки мартенсита (рис. 2, *в*).

В результате микротвердость стали в зоне сварного шва повышается от 204–210 до 290–320 HV<sup>200</sup>. Необходимо также отметить, что из-за воздействия высоких температур происходит интенсивный рост зерна от 10–20 мкм для зоны термического влияния до 40–50 мкм для зоны сварного шва. Данные изменения структуры и свойств, так же как и холодная деформация, приводят к снижению технологических и эксплуатационных свойств профилированных труб, применяемых для изготовления несущих конструкций автомобильной техники.

Вследствие этого профилированные трубы в местах изгиба обладают низкими пластичными свойствами, что в процессе эксплуатации приводит к их хрупкому разрушению.

**Термообработка опытных образцов и исследование.** Как показали предыдущие исследования, для устранения негативного влияния остаточных напряжений в сварных конструкциях целесообразно применять разупрочняющий отжиг или нормализацию с применением скоростных методов термического воздействия, таких, как электроконтактный или индукционный нагрев [1–3].

Для проведения исследований использовали образцы, вырезанные из профилированной электросварной трубы размером 50×40×2 мм, изготовленной из стали 20пс. Образцы для исследований вырезали из зоны сварного шва, основного металла и зоны загиба. В дальнейшем для исследования влияния температуры скоростного нагрева на струк-

туру и свойства стали 20пс образцы подвергали нагреву с помощью электроконтактной установки УКН-3 по режимам: нагрев до температур 600–900 °С со скоростью 50 °С/с, охлаждение на воздухе. Для сравнения термообработку проводили и в камерной печи СНОЛ 30/1100 по следующим режимам: нагрев до температур 600–900 °С, выдержка при заданной температуре 0,5 ч, охлаждение на воздухе. После термической обработки образцы испытывали на разрыв, измеряли микротвердость и изучали микроструктуру.

Как показали полученные результаты, скоростной нагрев в интервале температур 600–700 °С

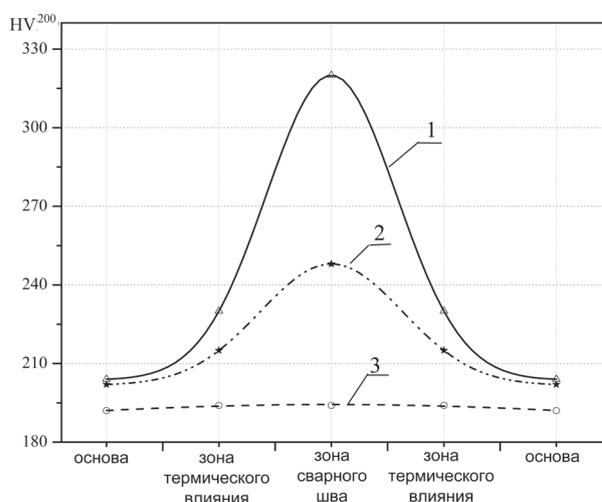


Рис. 3. Влияние температуры скоростного нагрева на твердость сварного шва трубы из стали 20пс: 1 – после сварки; 2 – скоростной нагрев 700 °С,  $V_H = 50$  °С/с, охлаждение воздух; 3 – скоростной нагрев 900 °С,  $V_H = 50$  °С/с, охлаждение воздух

приводит к плавному снижению микротвердости сварного шва и околошовной зоны. Так, микротвердость околошовной зоны после нагрева до 700 °С и охлаждения на воздух снижается с 230 до 214 HV<sup>200</sup>, а твердость сварного шва – с 320 до 250 HV<sup>200</sup> (рис. 3). Дальнейшее повышение температуры нагрева до 900 °С приводит к полному разупрочнению сварного соединения и выравниванию микротвердости по всему сечению трубы. При этом микротвердость стали 20пс снижается с 200–204 до 190 HV<sup>200</sup>.

Исследование влияния скоростного нагрева на структуру стали 20пс показало, что при температуре нагрева 600 °С структура основного металла и металла в зоне загиба остается без изменений, а в зоне сварного шва происходят процессы отпуска мартенситной фазы, сопровождающиеся перераспределением углерода и выделением мелкодисперсных карбидов.

Нагрев до температуры 700 °С сопровождается дальнейшим развитием процессов разупрочнения стали 20пс. Так, в структуре сварного шва и зоны термического влияния происходят процессы интенсивного выделения и коагуляции карбидной фазы. В зоне загиба также начинаются разупрочняющие процессы, которые сопровождаются перераспределением углерода и выделением мелкодисперсных карбидов, а также частичным изменением зеренной структуры.

Повышение температуры нагрева до 800 °С приводит к началу процессов фазового α→γ-превращения по всем исследуемым зонам профилиро-

ванной трубы, а нагрев до 900 °С позволяет сформировать по всему сечению трубы однородную рекристаллизованную феррито-перлитную структуру со средним размером зерна 5–10 мкм. На рис. 4 показаны микроструктуры зоны сварного шва при скоростном нагреве до различной температуры.

Для исследования влияния температуры нагрева на механические свойства стали 20пс образцы вырезали из профилированной трубы из зоны основного металла и нагревали в печи скоростным методом.

Как показали результаты исследования (рис. 5), в исходном состоянии сталь 20пс имеет следующие свойства:  $\sigma_B = 500\text{--}505$  МПа;  $\delta = 25\text{--}26$  %. Печной нагрев образцов до температуры 600 °С приводит к повышению прочности до 515 МПа, относительного удлинения до 31%. Дальнейшее повышение температуры печного нагрева приводит к плавному росту прочности и пластичности и при нагреве до 900 °С сталь 20пс приобретает свойства на уровне:  $\sigma_B = 515\text{--}520$  МПа;  $\delta = 36\text{--}37$  %. Применение скоростного нагрева для термообработки образцов стали 20пс показало, что при нагреве до температуры 600 °С происходит упрочнение стали до уровня  $\sigma_B = 540$  МПа за счет процессов распада мартенсита с выделением карбидной фазы, при этом относительное удлинение снижается до 22%. Повышение температуры скоростного нагрева до 700 °С приводит к началу процессов коагуляции карбидной фазы, что влечет за собой снижение временного сопротивления разрыву до 515 МПа и росту удлинения до 26%. Дальнейшее

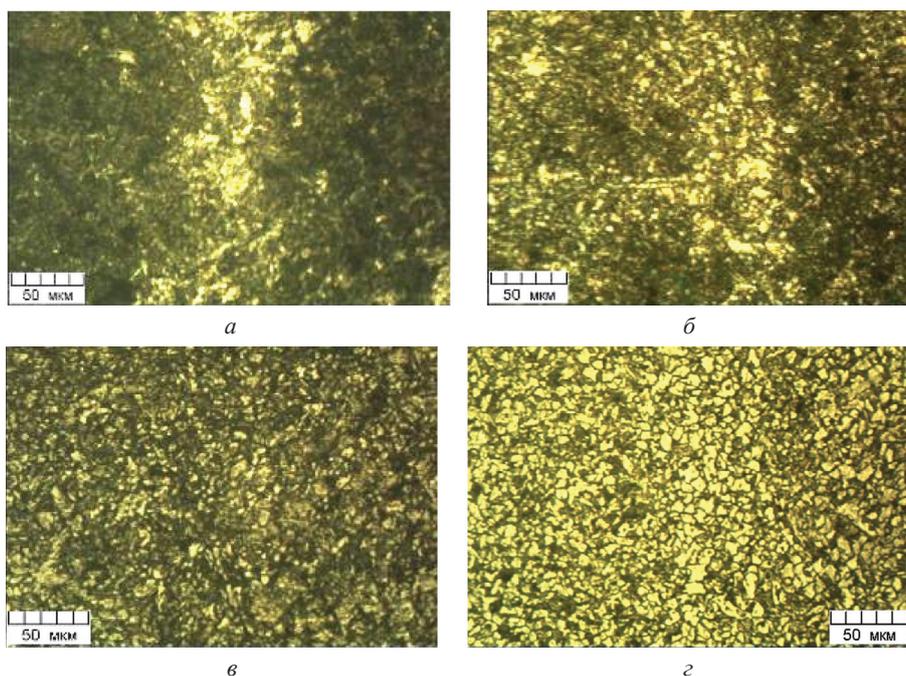


Рис. 4. Микроструктура сварного шва трубы после скоростного нагрева ( $V_H = 50$  °С/с): а – нагрев 600 °С; б – 700; в – 800; г – 900 °С

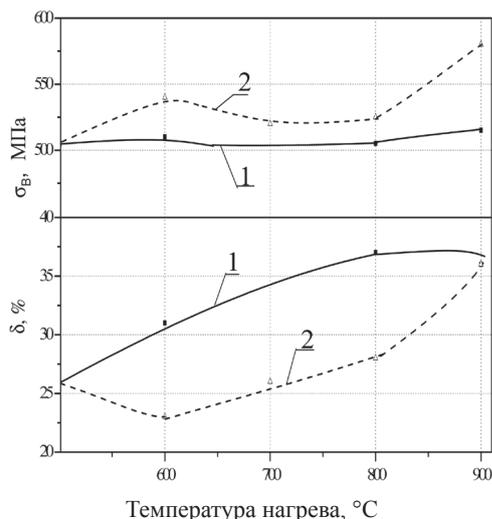


Рис. 5. Влияние температуры нагрева на физико-механические свойства трубы, изготовленной из стали 20пс: 1 – печной нагрев, 0,5 ч, охлаждение воздух; 2 – скоростной нагрев,  $V_n = 50$  °C/с, охлаждение воздух

повышение температуры до 800–900 °C приводит к плавному росту прочности и пластичности и после нормализации при 900 °C сталь 20пс приобретает наилучший комплекс механических свойств:  $\sigma_B = 570$  МПа;  $\delta = 36$ –37 %.

Исследования влияния температуры нагрева на механические свойства зоны сварного шва и зоны загиба профилированной трубы показали, что минимальной прочностью  $\sigma_B = 340$ –350 МПа в исходном деформированном состоянии обладает металл в зоне загиба (рис. 6). Металл в зоне сварного шва в исходном состоянии имеет прочность  $\sigma_B = 460$ –470 МПа. Необходимо отметить, что металл в данных зонах имеет очень низкую пластичность.

В результате скоростного нагрева в интервале температур 600–900 °C прочность стали 20пс в данных зонах изменяется по аналогичной зависимости от температуры, как и для основного металла трубы. В результате оптимальные прочностные свойства в зоне сварного соединения ( $\sigma_B = 530$ –540 МПа) и в зоне загиба ( $\sigma_B = 410$ –420 МПа) металл приобретает после нагрева до 900 °C.

**Разработка и промышленное освоение.** Для промышленной апробации процесса скоростного нагрева профилированных электросварных труб был выбран наиболее эффективный метод термообработки для данного полуфабриката, которым является локальный индукционный нагрев движущейся заготовки в поперечном электромагнитном поле.

Для успешной реализации метода были выполнены исследования по выбору оптимальных параметров индукционной термообработки, таких, как частота нагрева, удельная мощность нагрева, ко-

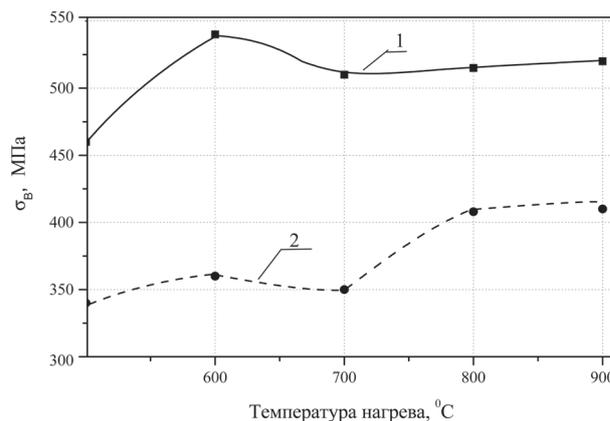


Рис. 6. Влияние температуры нагрева на физико-механические свойства трубы, изготовленной из стали 20пс: 1 – зона сварного шва; 2 – зона загиба трубы

нечная температура и равномерность нагрева, время нагрева.

Частота индукционного нагрева определяется из формулы

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

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

Принимая глубину проникновения тока, равную толщине стенки трубы 2–3, получаем расчетное значение частоты тока, для которой наиболее близкие характеристики имеет промышленное оборудование с рабочей частотой 10 кГц. С помощью программного продукта ThermoSim 2 было выполнено моделирование распределения температурных полей по длине нагреваемой заготовки при различных значениях зоны электромагнитного поля. В зависимости от конструкции индуцирующего токопровода для нагрева заготовки может быть применен индукционный виток, состоящий из одного и более витков. На рис. 7 показано распределение температуры нагрева по длине заготовки при различном количестве витков индуцирующего токопровода.

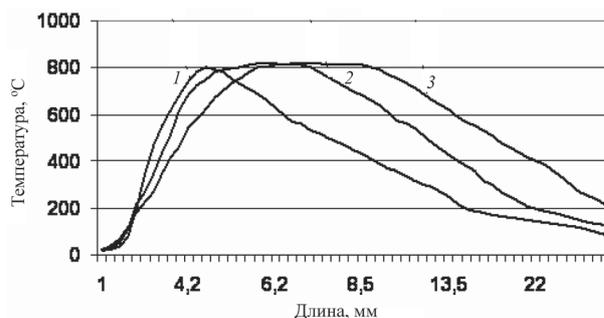


Рис. 7. Распределение температуры по длине заготовки при различных значениях зоны электромагнитного поля: 1 – один виток; 2 – два витка; 3 – три витка. Индуцирующий токопровод шириной 14 мм



Рис. 8. Общий вид промышленной установки для индукционной термообработки труб

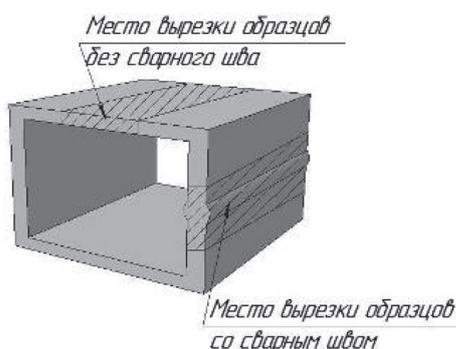


Рис. 9. Схема вырезки образцов для испытания стенок трубы на растяжение

Граничным условием данного расчета является температура нагрева поверхности 800–900 °С. Из рисунка видно, что при одном витке индуцирующего токопровода времени нахождения материала заготовки в зоне температур, необходимых для структурных превращений, недостаточно. Для полного прохождения структурных превращений и обеспечения равномерности нагрева по сечению заготовки количество индукционных витков должно быть не менее 3.

Промышленное освоение результатов исследований проводили на ОАО «МАЗ» на специально спроектированной индукционной установке частотой 10 кГц с применением трехвиткового индуктора (рис. 8). Технология термообработки предусматривает индукционный нагрев до температуры 800–900 °С профильных труб четырех типоразмеров и охлаждение на воздухе. Работа установки осуществляется в автоматическом режиме с контролем конечной температуры нагрева пирометром.

**Сравнительные испытания.** В дальнейшем термообработанные трубы испытывали на механические свойства. Испытаниям на растяжение подвергали отрезки труб размером 80×40×3 мм и длиной 350 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

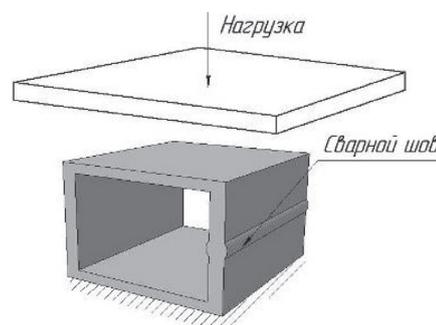


Рис. 10. Схема испытания образцов труб на сплющивание

Таблица 1. Результаты испытания 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	525	33,0
3	850–920 °С	530	37,9

Также были проведены испытания на растяжение образцов, вырезанных из различных мест данных труб. Испытанию подвергали трубы, прошедшие термообработку в интервале температур 850–920 °С и трубы без термообработки. Образцы вырезали согласно схеме, показанной на рис. 9. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты испытания образцов, изготовленных из различных зон труб размером 80×40×3 мм

Образец	Вид термообработки	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Со сварным швом	Без термообработки	540	10,3
	850–920 °С	500	18,7
Без сварного шва	Без термообработки	480	33
	850–920 °С	500	33

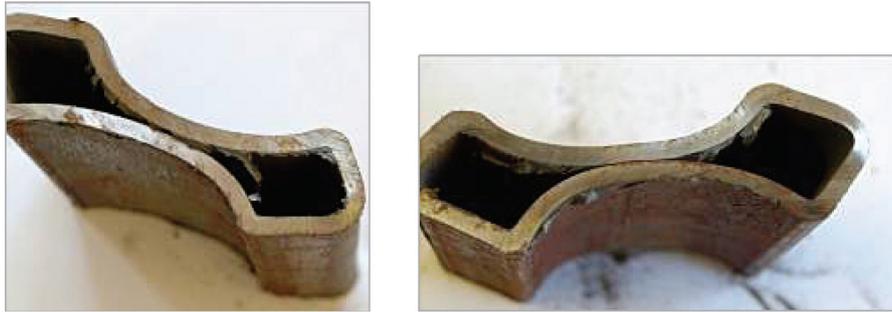


Рис. 11. Внешний вид образцов из трубы, прошедшей индукционную термообработку после испытаний на сплющивание



Рис. 12. Внешний вид образцов из трубы в состоянии поставки после испытаний на сплющивание

Установлено, что сварной шов обладает наименьшей пластичностью. При термообработке пластичность образцов со сварным швом увеличивается на 81% при незначительном уменьшении прочности. Термообработка образцов без сварного шва не привела к изменению пластичности и значительному изменению прочности.

На образцах из прямоугольных труб размером 60×40×3 мм были проведены испытания на сплющивание и растяжение. Были отобраны партии труб, термообработанные до 850–920 °С и трубы без термообработки. Для испытаний на сплющивание из данных труб были изготовлены образцы длиной 100 мм. Испытание производили согласно схеме, показанной на рис. 10.

Результаты испытания оценивали визуально (рис. 11, 12).

Установлено, что на образцах труб, подвергшихся индукционной термической обработке после приложенной нагрузки сплющивания, разрывов не обнаружено. На образцах в состоянии поставки (без термической обработки) после приложения нагрузки сплющивания образовались разрывы по ребрам трубы.

### Вывод

В результате исследований было показано, что скоростной нагрев профилированных электросварных труб, изготовленных из стали 20пс, позволяет оптимизировать механические свойства и повысить конструкционную прочность несущих конструкций автомобильной техники и, тем самым, увеличить ресурс ее эксплуатации и исключить преждевременный выход из строя.

### Литература

1. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А. И. Гордиенко, П. С. Гурченко, А. И. Михлюк, И. И. Вегера. Минск: Беларуская навука, 2009.
2. Михлюк А. И., Гурченко П. С. Индукционный нагрев – способ повышения свойств стального трубного проката // Автомоб. пром-сть. 2006. № 6. С. 35–39.
3. Гордиенко А. И., Ивашко В. В., Вегера И. И. Исследование процессов разупрочнения холоднодеформированной листовой стали 09Г2С, применяемой для изготовления сосудов, работающих под давлением // Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование для упрочнения и восстановления свойств поверхности материалов. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009. Кн. 2. С. 70–75.