

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»  
**Нижнетагильский технологический институт (филиал)**

**В. А. КОРОТКОВ**

# **ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА**

Нижний Тагил  
2012

УДК621.791

ББК 34

К68

Рецензент:

зав. кафедрой «Технология и организация технического сервиса»  
Челябинской государственной агроинженерной академии,  
д-р техн. наук, проф. В. В. Ерофеев

Научный редактор:

директор НТИ (филиал) УрФУ, д-р техн. наук, проф. В. Ф. Пегашкин

**Коротков В. А.**

**К68** Поверхностная плазменная закалка /В. А. Коротков; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал)УрФУ, 2012 . – 64 с.

**ISBN 978-5-9544-0060-1**

Рассмотрено развитие поверхностной закалки плазменной дугой. Приведены исследования свойств плазменной закалки и результаты практического примененияустановки УДГЗ-200, которая сделала плазменную закалку доступной для широкого применения.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов и производственных специалистов.

**УДК 621.791**

**ББК 34**

Библиогр.: 38 назв. Табл. 10. Рис. 53.

**ISBN 978-5-9544-0060-1** © Коротков В. А., 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА КАК СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ.....	5
1.1.Предпосылки к появлению плазменной закалки.....	5
1.2. Разработка плазменной закалки .....	6
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ УСТАНОВКОЙ УДГЗ-200.....	12
2.1. Исследование скорости охлаждения при плазменной закалке .....	12
2.2. Исследование плазменной закалки низкоуглеродистой стали .....	22
2.3. Плазменная закалка углеродистых и легированных сталей .....	26
2.4. Плазменная закалка чугуна.....	34
3. ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ УДГЗ-200 В ПРОИЗВОДСТВЕ .....	37
3.1. Закалка зубчатых, шлицевых и иных поверхностей .....	38
3.2. Закалка крановых рельс и колес, канатных шкивов, тормозных барабанов, роликов рольгангов .....	43
3.3. Закалка штампов .....	46
3.4. Закалка корпусов оборудования и защитных накладок .....	49
4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ.....	55
4.1. Экономия от уменьшения расхода запасных частей и ремонтных услуг .....	55
4.2. Экономия от сокращения ремонтных простоев .....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	60

## ВВЕДЕНИЕ

Закалка, как средство снижения износа, совершенствовалась путем применения высококонцентрированных источников поверхностного нагрева. В том числе: газопламенного, в электролите, ТВЧ, лазерным лучом и др. В 80-х гг. XX в. для поверхностной закалки начали использовать плазменную дугу. Однако интерес к ней в 90-х гг. стал снижаться, т. к. практическое применение осложнялось высокой чувствительностью качества закалки к настройке режима.

Новый импульс плазменная закалка получила с разработкой в 2002 г. установки УДГЗ-200. Ее выполнили в ООО «Композит», созданном в 1990 г. при Нижнетагильском филиале УПИ, ныне УрФУ. Путем совершенствования оборудования и технологии удалось стабилизировать тепловое воздействие дуги на поверхность и сделать возможным выполнение закалки вручную. Несмотря на неизбежные при этом колебания скорости и длины дуги, закаленный слой получается стабильным, а поверхность – без оплавления.

В век «безлюдных» производств разработка ручной технологии может показаться ошибочной. Но это не так. Ручные технологии, благодаря универсальности, демонстрируют живучесть. С разработкой установки УДГЗ-200 закалка стала доступнее. *Теперь закаливается – что было не возможно.* При этом закалка может использоваться в составе автоматов или роботов. С ее помощью решены важные проблемы на ведущих предприятиях Урала.

Установка УДГЗ-200 прошла сертификацию и выпускается по ТУ 3862-001-47681378-2007. К концу 2012 г. было произведено более 40 установок, которые поставлены на предприятия России, Украины, Казахстана. В 2008 г. установка отмечена серебряной медалью на Женевском салоне изобретений и инноваций.

Тому, как применяется установка УДГЗ-200, какие обеспечивает свойства сталям и чугунам, как сказывается на долговечности деталей, посвящается настоящая монография.

# 1. ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА КАК СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ

## 1.1. Предпосылки к появлению плазменной закалки

Закалка представляет собой нагрев до некоторой критической температуры ( $\geq 750^{\circ}\text{C}$ ) и последующее быстрое охлаждение, в результате чего твердость стали и чугуна увеличивается в 2-3 раза, с HRC20...25 до HRC50...65. Благодаря этому изнашивание деталей замедляется. Снижение износа может составлять десятки и даже сотни раз. Это парадоксально: увеличение твердости составляет 2-3 раза, а увеличение износостойкости происходит на порядок или больше. Но так и есть, и поэтому закалка остается наиболее распространенным способом упрочнения. Многие детали (пружины, шариковые и роликовые подшипники качения, режущий и штамповый инструмент) без закалки оказываются неработоспособными.

Первоначально разработанная закалка с нагревом в печах была невозможна или затруднительна на массивных деталях или деталях большой длины, поэтому шел поиск новых способов ее проведения. По мере появления высококонцентрированных источников нагрева их применяли для *поверхностной закалки*. В первом десятилетии XX в. появилась газопламенная закалка, в 30–40-х гг. – электроконтактная, в электролите и закалка ТВЧ (токами высокой частоты), позднее для поверхностной закалки получил применение лазерный луч [1–3].

На рубеже 40–50-х гг., в СССР была предпринята попытка поверхностной закалки сварочной (электрической) дугой [4]. Было изготовлено механическое устройство для поверхностного разогрева концов рельс графитовым электродом и последующего охлаждения водой. В пятне под дугой теплота концентрируется по центру и оплавляет поверхность детали. Чтобы избежать этого, применили сканирование (колебание) дуги переменным магнитным полем. В результате она уподобилась вееру: распределение температуры под дугой стало более равномерным и оплавление поверхности устранилось. Однако быстрое обгорание электрода не позволило внедрить эту технологию в производство.

В это же время в США решали проблему автоматизации аргонодуговой наплавки нефтехимической арматуры твердосплавным «стеллитом». Из-за хрупкости этот кобальтовый сплав не поддается волочению в проволоку, поэтому непрерывная подача в дугу могла осуществляться лишь вдуванием его в виде порошка. Но порошок при вдувании разле-

тался, осаждался на кончике вольфрамового электрода и быстро выводил его из строя. Чтобы сберечь электрод, его убрали внутрь сопла (рис. 1.1). Этим не только решили имеющуюся проблему, но получили два дополнительных эффекта: удаленный от сварочной ванны и хорошо защищенный внутри сопла от воздуха вольфрамовый электрод увеличил наработку, дуга же, за счет обжата в узком сопле, повысила температуру и, благодаря этому, стабильность.

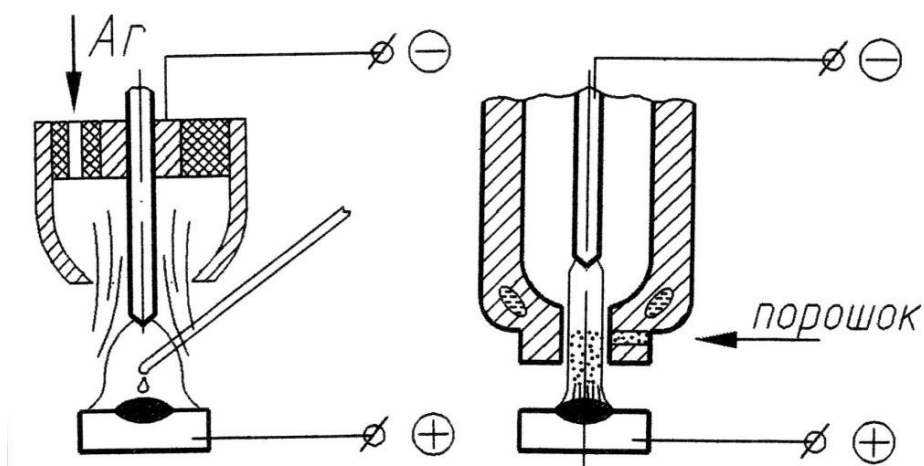


Рис. 1.1. Аргоновая (слева) и плазменная дуга (справа) горелки

Новая дуга сначала называлась «обжатой», а позднее за ней закрепилось название «плазменной». Если дуга горит между электродом и изделием, то она называется «дугой прямого действия». Но возбуждение дуги, также, возможно между электродом и соплом. При этом из сопла выдувается факел, который называется «плазменной струей» или «дугой косвенного действия».

Плазменная струя получила преимущественное применение для напыления, а плазменная дуга прямого действия – для наплавки, сварки и резки [5–7].

## 1.2. Разработка плазменной закалки

Сведения о плазменной закалке появились в 80-х гг. XX в. [8, 9]. Наличие в промышленности различных плазменных аппаратов (для резки, сварки, напыления) подталкивало новаторов приспособлять их для поверхностной закалки. Установку микроплазменной сварки использовали для поверхностной закалки деталей шахтного оборудования и ав-

томобильных распределительных валов [10]. Установку для напыления с мощной дугой косвенного действия применили для закалки прокатных валков [11].

Большую работу по адаптации сварочных аппаратов для поверхностной закалки провели в Нижнетагильском филиале Уральского политехнического института, ныне – Уральского федерального университета.

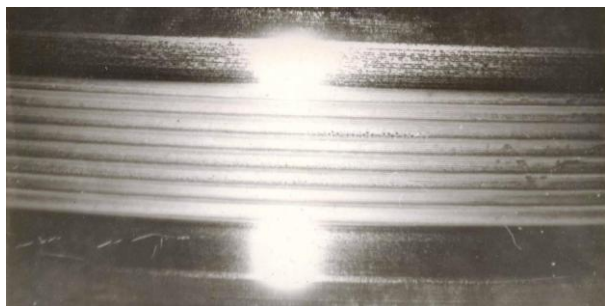


Рис.1.2. Поверхность бандажа  
правильной машины  
с плазменной закалкой

Модернизация плазмотрона позволила использовать установку плазменной сварки УПС-501 для проведения поверхностной закалки дугой прямого действия. Были найдены режимы закалки без оплавления поверхности и исследованы свойства закаленного слоя на различных углеродистых и легированных сталях [12]. Внедре-

ние этой разработки в производство было сделано на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК) в 1985г. В это время там шло освоение производства более тяжелой марки рельсов Р65 вместо Р50, что увеличило нагрузки на бандажированные ролики рельсоправильных машин. Стойкость бандажей упала, появились внеплановые остановки, снижавшие выработку одного из ведущих цехов комбината. Предпринимались попытки увеличения твердости бандажей свыше НВ400 за счет объемной, газовой и закалки ТВЧ, которые к успеху не привели, т. к. сопровождалась преждевременными разрушениями бандажей или отколами закаленного слоя. Остались без положительного результата и эксперименты с применением новых марок сталей. Поэтому, несмотря на то, что плазменная закалка в то время в промышленных масштабах была не известна, все же приняли решение о ее опробовании. Успех был замечательный, стойкость бандажей с плазменной закалкой (рис.1.2) увеличилась в 2-4 раза, в зависимости от места расположения бандажа в правильной машине [13]. Впоследствии разработанная технология с усовершенствованиями стала применяться для поверхностной закалки ручьев (калибров) валков горячей прокатки [14].

Таким же образом как установка УПС-501, была адаптирована для плазменной закалки установка плазменной резки УПР-404 [15]. Она получила применение для упрочнения наплавленных роликов рольгангов, транспортирующих закаленные рельсы. За ее счет срок службы роликов

увеличился более чем в три раза. Для исключения трещин выявили оптимальное соотношение толщин закаленного и наплавленного слоев, а для увеличения глубины закалки – способ сканирования дуги магнитным полем [16, 17].

В отличие от плазменных установок, оборудование для сварки вольфрамовым (W) неплавящимся электродом в аргоне менее сложное и более распространенное. Поэтому была выполнена его адаптация к поверхностной закалке. Недостаток аргоновой дуги состоит в концентрации тепловой энергии в центральной части. Как следствие, ширина закаленной дорожки без оплавления поверхности получается пренебрежимо малой. Чтобы увеличить ее дуге, по аналогии с работой [4], подвели магнитное поле, которое придало ей веерообразную форму и равномерно распределило тепловую энергию на ширину до 15 мм. В результате был получен способ аргонодуговой закалки [18].

Плазменные установки с дугой косвенного действия, адаптированные к проведению поверхностной закалки, применялись для упрочнения валков, железнодорожных колес и иных деталей [11, 19].

Исследования, проведенные в 80–90-х гг., позволили выявить важные свойства плазменной закалки [9–13, 17, 18, 20]. Твердость закаленного слоя обычно соответствует твердости, получаемой при закалке с печного нагрева, или является несколько выше (на HRC 1...3). При закалке высокоуглеродистых сталей (150XНМ) сохраняется значительное количество остаточного аустенита, из-за чего поверхность закаленного слоя имеет пониженную твердость. Кроме того, за счет компактной кристаллической решетки аустенита, поверхностные слои уменьшаются в объеме и закаленная поверхность опускается ниже прилегающих незакаленных участков. Твердость с удалением от поверхности постепенно убывает. Толщина слоя закаленного дугой прямого действия составляет 0,5–1,5 мм, дугой косвенного действия – до 3–5 мм. При наложении закаленных полос в каждой предыдущей формируется узкий участок с пониженной твердостью, вызванный отпускными процессами от теплового воздействия последующей полосы.

Несмотря на перечисленные успехи в решении задач по увеличению срока службы деталей и инструмента, плазменная закалка в 90-х гг. не обрела самостоятельной жизни. Ее промышленное применение в основном поддерживалось разработчиками технологий. Плазменные установки для поверхностной закалки как самостоятельный вид товара не выпускались.



### *Установка ручной плазменной закалки УДГЗ-200*

Разработанные технологии плазменной закалки имели существенный недостаток – их ручное применение было не возможно или затруднительно. Дуга косвенного действия работает при напряжениях более 250В, которые не допустимы в ручном процессе. Дуга прямого действия чувствительна к настройке режима. Отклонения от оптимального, которые неизбежны при ручной закалке, сопровождаются, или оплавлением закаливаемой поверхности, или исчезновением закаленного слоя. Поэтому вышеописанные технологии плазменной закалки применялись в автоматическом режиме, когда параметры настройки легко поддерживаются неизменными.

В современный век роботов и «безлюдных» производств разработка ручной технологии может показаться ошибочной. Однако, ручные технологии, благодаря универсальности, демонстрируют живучесть. Так, сегодня в мире основной объем сварки (более 80%) выполняется электродами или полуавтоматами, т. е. вручную. По аналогии ожидалось, что с разработкой ручного способа плазменной закалки объемы ее применения возрастут, и произойдет это за счет изделий, которые ранее по тем или иным причинам закалить было не возможно, и они, эксплуатируясь неупрочненными, становились причиной частых ремонтов.

При ручной закалке плазменная дуга должна обеспечивать равномерный прогрев независимо от естественных и неизбежных при этом колебаний длины дуги и скорости ее перемещения. Критерием оценки служит отсутствие внезапных оплавлений поверхности и исчезновений закаленного слоя. Направление в исследованиях было выбрано с учетом работы [21]. В ней установлено, что обжатие сварочной дуги возможно не только в сопле, но и за счет газового потока, истекающего через контролируемый зазор между соплом и электродом. В результате был разработан способ ручной плазменной закалки, а также горелка для его осуществления и на их основе – закалочная установка УДГЗ-200(рис. 1.3) [22–24]. Закалка выполняется горелкой, небольшие размеры которой делают ее удобной для ручного манипулирования, позволяют добираться ею до труднодоступных мест и *упрочнять то, что ранее не упрочнялось.*

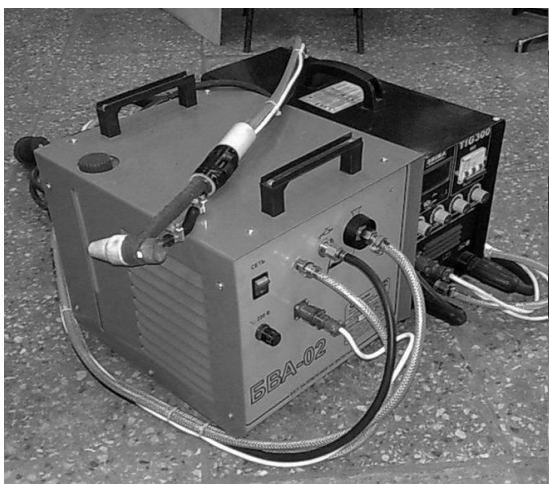


Рис. 1.3. Установка УДГЗ-200

При закалке сварщик перемещает дугу (рис.1.4) по поверхности со скоростью, обеспечивающей легкое «вспотевание» металла под дугой. Это состояние контролируется не труднее, чем плавление при сварке, но оно позволяет поддерживать необходимый для закалки нагрев, и, одновременно, не допускает грубого повреждения поверхности.

Дуга оставляет на поверхности закаленные полосы шириной 8–12 мм, которые сварщик располагает с некоторым перекрытием. Они окрашены «цветами побежалости», т. е. покрыты тонкой пленкой окислов, которые не оказывают существенного влияния на шероховатость поверхности (рис.1.5). Плазменная закалка не дает деформаций, благодаря чему закаленным деталям, во многих случаях, не требуются финишная шлифовка.

Закалка происходит за счет отвода тепла в тело детали без подачи воды на место нагрева. Поэтому установка



Рис. 1.4. Плазменная дуга во время закалки

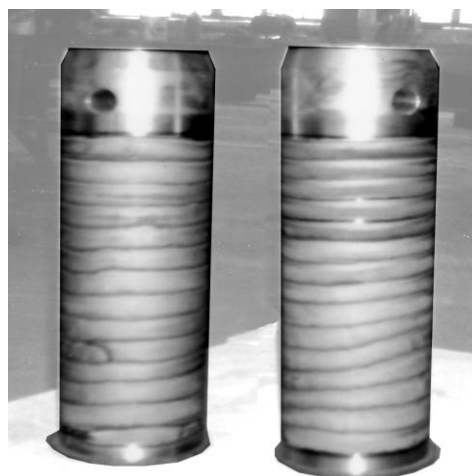


Рис. 1.5. Пальцы ковша экскаватора с плазменной закалкой



Рис. 1.6. Закалка установкой УДГЗ-200

УДГЗ-200 применяется на ремонтных площадках (рис. 1.6), по месту механообработки и эксплуатации деталей, а не только в термических цехах и специализированных участках.

Твердый (HRC45...65) слой закалки (0,5–1,5мм) многократно увеличивает срок службы крановых рельс и колес, зубчатых и шлицевых соединений, канатных блоков, вырубных, формовочных, вытяжных штампов и других ответственных деталей.

Наличие установки УДГЗ-200 восполняет отсутствие печей для закалки, цементации, азотирования, установок ТВЧ; делает закалку экологически чистой. Работу на нейлегко осваивают сварщики 2–3 разрядов. Закалка установкой УДГЗ-200 может быть механизирована, автоматизирована и роботизирована.

#### *Технические характеристики установки УДГЗ-200*

Состав установки: источник питания, горелка, блок водяного охлаждения горелки.

Масса .....	(20 + 0,5 + 20) кг
Габариты комплекта .....	(480×205×355) + (360×420×390) мм
Напряжение сети .....	380 В
Мощность .....	10 кВт
Производительность .....	25–95 см <sup>2</sup> /мин
Рабочий газ .....	аргон (15 л/мин)
Шероховатость .....	в диапазоне Rz 4...40*
Глубиназакалки .....	0,5–1,5 мм
Твердость закалки .....	HRC до 65 (зависит от марки стали)

Благодаря установке УДГЗ-200 увеличена номенклатура закаливаемых изделий и решенряд важных проблем на ведущих предприятиях Урала: ОАО «ЧМК», ОАО «НТМК», ОАО «ВСМПО-АВИСМА», ОАО «ЧТПЗ», ОАО «КГОК» и др. Она дала импульс разработке новых способов проведения поверхностной закалки вручную [25, 26].Через пять лет после разработки установка УДГЗ-200 прошла сертификацию, и по ТУ 3862-001-47681378-2007 было начато ее промышленное производство. К концу 2012г. выпущено более 40 установок, которые поставлены на предприятия России, Украины, Казахстана.

---

\* Плазменная закалка ухудшает поверхность не более чем на 20 %.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ УСТАНОВКОЙ УДГЗ-200

### 2.1. Исследование скорости охлаждения при плазменной закалке

#### *Плазменная закалка массивных тел*

Технология обычной закалки состоит в нагреве стали до температуры аустенизации ( $\geq 750$  °C) и последующем быстром охлаждении, которое, как правило, обеспечивается помещением разогретой детали в охлаждающую жидкость (вода, масло) или подачей жидкости на разогретую поверхность. При закалке плазменной дугой рабочий перемещает ее по поверхности, создавая необходимый для аустенизации нагрев. Из-за малого объема разогреваемого под дугой металла высокая скорость охлаждения может обеспечиваться одной только теплопроводностью (отводом тепла в ненагретые области изделия), без подачи на нагретую поверхность охлаждающей жидкости.

Исследование скоростей охлаждения при закалке установкой УДГЗ-200 по теории Н. Н. Рыкалина выполнено в работе [27]. Были рассчитаны скорости охлаждения в точке на оси движения по полубесконечному (массивному) телу мощного точечного источника тепла, через 1 с после прохождения ее тепловым источником:

$$(2.1.1) \quad \omega = q / 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t^2,$$

где  $\omega$  – скорость охлаждения, °C/с;

$q = I \cdot U$  – мощность дуги, Вт;

$U = \text{const}$  – напряжение на дуге (30 В);

$I = \text{varia}$  – сила тока (50–250 А);

$\lambda = \text{const}$  – коэффициент теплопроводности (74,4 Вт/м·°C);

$v = \text{varia}$  – скорость перемещения дуги (5–40 м/ч);

$t = \text{const}$  – время (1 с).

Параметры режима плазменной закалки выбраны в диапазонах типичных для установки УДГЗ-200. Результаты расчетов приведены в табл. 2.1.1. Можно отметить, что расчетные скорости охлаждения 11459,9–286,52°C/с частью больше, а частью меньше скорости охлаждения при закалке в воде – 500 °C/с, но существенно выше скоростей охлаждения при сварке (15 °C/с), при которых происходит

закалка [28]. Таким образом, при плазменной закалке крупных деталей установкой УДГЗ-200 скорости охлаждения достаточны, чтобы проводить ее без дополнительного охлаждения водой.

Таблица 2.1.1

Скорости охлаждения в зависимости от скорости перемещения дуги  
при различном токе, °C/с

$v$ , м/с	$\omega$ ( $I = 50$ А)	$\omega$ ( $I = 100$ А)	$\omega$ ( $I = 150$ А)	$\omega$ ( $I = 200$ А)	$\omega$ ( $I = 250$ А)
0,0014	2291,98	4583,96	6875,93	9167,91	11459,9
0,0028	1145,99	2291,98	3437,97	4583,96	5729,94
0,0055	572,99	1145,99	1718,98	2291,98	2864,97
0,0083	382,11	763,99	1145,99	1527,99	1909,98
0,0111	286,52	572,99	859,49	1145,99	1432,49

По формуле (2.1.1) рассчитывалась скорость охлаждения при значениях коэффициента теплопроводности, соответствующих железу (низкоуглеродистой стали), углеродистой (конструкционной) стали и чугуны. Значения параметров для расчета приняты следующие:

$\Lambda = \text{varia}$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C: 62,8 – чугун, 45,4 – сталь, 74,4 – железо;

$I = \text{const}$  – сила тока (150 А);

$U = \text{const}$  – напряжение на дуге (30 В);

$q = I \cdot U = \text{const}$  – мощность дуги (4500 Вт);

$v = \text{const}$  – скорость перемещения дуги (20 м/с);

$t = \text{varia}$  – время с начала нагрева (2–16 с).

Варьировалось время, чтобы судить о скоростях охлаждения в области распада аустенита и в области мартенситного превращения. При небольших значениях времени скорости охлаждения соответствуют диапазону высоких температур, в которых происходит распад аустенита (>550 °C), а при большом времени – низким температурам, когда металл перешел в закаленное состояние.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.1.2. Они показывают, что скорости охлаждения для железа, стали и чугуна различаются не столь существенно, причем наименьшие они у низкоуглеродистой стали (железа), которая термическому упрочнению подвергается редко из-за низкой эффективности. Это позволило сузить (путем исключения

чугуна и низкоуглеродистой стали) диапазон дальнейших исследований, направленных на уточнение температуры, при которой происходит замедление скоростей охлаждения. Для этого по формуле (2.1.2) рассчитаны скорости охлаждения в течение 1–6 с.

Таблица 2.1.2

Скорости (°C/с) охлаждения для чугуна, стали и железа  
при различном временном параметре (с)

$t$	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega_{\text{ч}}(t)$	51,32	12,83	5,702	3,207	2,053	1,426	1,047	0,802
$\omega_{\text{с}}(t)$	70,989	17,747	7,888	4,437	2,84	1,972	1,449	1,109
$\omega_{\text{ж}}(t)$	43,318	10,83	4,813	2,707	1,733	1,203	0,884	0,677

$$T = \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t}, (2.1.2)$$

где  $T$  – температура нагрева;

$\lambda = \text{const}$  – коэффициент теплопроводности стали (45,4 Вт/м·°C);

$I = \text{const}$  – сила тока (150 А);

$U = \text{const}$  – напряжение на дуге (30 В);

$q = I \cdot U = \text{const}$  – мощность дуги, Вт;

$v = \text{const}$  – скорость перемещения дуги (20 м/ч);

$t = \text{varia}$  – время с начала нагрева (1, 2, 3, 4, 5 и 6 с).

Результаты расчетов приведены в табл. 2.1.3. По ним можно отметить, что существенное замедление скорости охлаждения по истечении 4 и 6 с, происходит при температурах 709,89°C и 473,26 °C, т. е. в интервале непосредственно предшествующем интервалу мартенситного превращения (400–200 °C). Это означает, что скорости охлаждения достаточно высоки, чтобы не допустить распада аустенита по перлитному механизму с образованием мягких структур. Но в интервале мартенситного превращения они падают, что благоприятствует предупреждению закалочных трещин. Подобный прием (быстрое охлаждение до 400–500 °C, а затем – замедленное) используется в термической практике. Он известен как закалка «через воду в масло».

Таблица 2.1.3

Температура по оси движения теплового источника  
спустя определенное время после его удаления

$T, \text{с}$	1	2	3	4	5	6
$T, ^\circ\text{C}$	2839,55	1419,77	946,52	709,89	567,91	473,26

$$2l = \sqrt{\frac{8q}{\pi \cdot e \cdot v \cdot c_p \cdot \Delta T_l}}, (2.1.3)$$

где  $c_p = \text{const}$  – теплоемкость стали ( $4,8 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{K}$ );

$I = \text{varia}$  – сила тока (100 А, 150 А, 200 А);

$U = \text{const}$  – напряжение на дуге (30 В);

$q = I \cdot U$  – мощность дуги, Вт;

$v = \text{varia}$  – скорость перемещения дуги (см/с).

По формуле (2.1.3.) был выполнен расчет ширины закаленных дорожек, как ширины изотермы  $750^\circ\text{C}$ . Данная температура принята за минимальную, которая необходима для прохождения металлом аустенизации, т. е. приобретения способности к закалке при последующем быстром охлаждении. Результаты расчетов, приведенные в табл. 2.1.4, показывают, что в исследованном диапазоне режимов ширина закаленной дорожки изменяется в интервале 8,4–23,7 мм.

Таблица 2.1.4

Ширина изотермы  $750^\circ\text{C}$  в зависимости от параметров режима (см)

$v, \text{см/с}$	$I = 100 \text{ А}$	$I = 150 \text{ А}$	$I = 200 \text{ А}$
0,278	1,676	2,053	2,371
0,556	1,185	1,452	1,676
0,833	0,968	1,185	1,369
1,111	0,838	1,027	1,185

Проверку расчета выполнили путем сравнения с шириной закаленных полос на головке рельса Р50. Результаты, приведенные в табл. 2.1.5, показали хорошее совпадение расчетных и опытных значений. Лучшее совпадение получено при высоких скоростях перемещения дуги. Это объясняется тем, что расчетная схема предполагает быстро движущийся источник тепла.

Эксперимент также позволил установить влияние параметров режима закалки на ширину закаленных полос. При увеличении скорости перемещения горелки в 4 раза ширина дорожки уменьшается незначительно (~30 %), а увеличение силы тока в 2 раза приводит к пропорциональному увеличению ширины дорожки.

Таблица 2.1.5

Твердость и ширина (в скобках расчетные значения)  
закаленных полос на головке рельса Р50

$I$ , А	$V_{\text{зак}}$ , м/ч	Ширина дорожки, мм	Твердость, HRC (прибор УЗИТ-3)
100	10	11 (17)	62
	25	8	61
	40	7 (8)	61
150	10	15 (20)	62
	25	12	61
	40	11 (10)	61
200	10	20 (24)	64
	25	16	64
	40	12 (12)	63

Кроме ширины измеряли твердость закаленных полос переносным ультразвуковым прибором УЗИТ-3. Она пренебрежимо мало зависит от силы тока и скорости перемещения закалочной горелки. Это во многом предопределено тем, что скорости охлаждения, как показали вышеприведенные расчеты, существенно (на порядок и более) превышают минимально необходимую (критическую) скорость закалки. Незначительное увеличение твердости с HRC 61 до HRC 64 при росте тока со 100 А до 200 А нельзя объяснять только с позиции условий охлаждения. Вероятно, этому способствовало сопутствующее увеличение времени пребывания нагретого металла в аустенитном состоянии и, как следствие, более полное растворение в нем легирующих элементов, что также способствует росту твердости при закалке.

#### *Плазменная закалка пластин*

На скорость охлаждения оказывают влияние размеры детали. Поверхности, расположенные вблизи горения дуги, дают отражение теплового потока и вызывают автоподогрев (разогрев детали в ходе закалки), способный в некоторых случаях подавлять мартенситное превращение.



Для типичных режимов закалки установкой УДГЗ-200 по методике работы [29] находилась критическая толщина пластины, при которой скорость охлаждения снижается до 80% от скорости охлаждения в массивном теле. Установлено, что для режимов с высокой погонной энергией (22000 Дж/см) критическая толщина пластины составляет ~4 см, а для низкой погонной энергии (1700 Дж/см) – приблизительно 0,3 см.

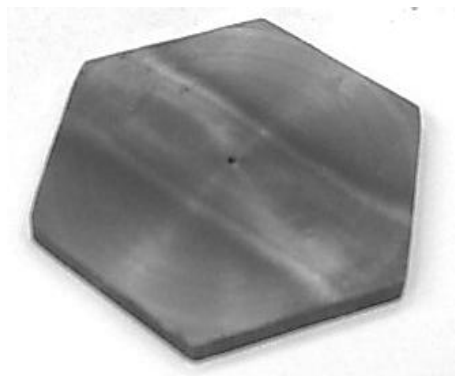


Рис. 2.1.1. Образец для исследования скорости охлаждения при плазменной закалке пластин. Визуально различимая полоса оставлена плазменной дугой

Для экспериментальной проверки расчета использовалась термопара хромель-алюмель ТХА (К). Ее сваренные концы плотно закрепляли в отверстиях тонких (толщиной 3–4 мм) пластин из стали 45, которые отрезали от шестигранника (рис. 2.2.1). Закалка выполнялась установкой УДГЗ-200 на токе 200 А при скорости 20 м/ч, т. е. с высокой погонной энергией. Показания термопар снимались на измеритель ТРМ-200 и через адаптер сети АС 4 передавались на компьютер. Затем в

программе *Excel* строились графики изменения температур в зависимости от времени, по которым определялись скорости охлаждения в том или ином диапазоне температур. Графики изменения температуры при нагреве и охлаждении образцов приведены на рис. 2.1.2.

По ним видно, что при низких температурах в обоих случаях происходит резкое замедление остывания, что свидетельствует о наступлении «автоподогрева», т. е. об увеличении температуры всего образца. У более тонкой пластины (толщиной 3 мм) замедление остывания начинается при температуре приблизительно 400 °С, которая выше точки начала мартенситного превращения в стали 45 ( $M_s$  350 °С), что делает маловероятным получение закалки. В пластине толщиной 4 мм температура «автоподогрева» (200 °С) ниже начала мартенситного превращения, что допускает закалку.

В связи с этим из нее был вырезан темплет, на поперечном сечении которого приготовлен макрошлиф, и на приборе ПМТ-3М с нагрузкой 500 г·с выполнено измерение микротвердости по методу Виккерса, распределение которой представлено на рис. 2.1.3.

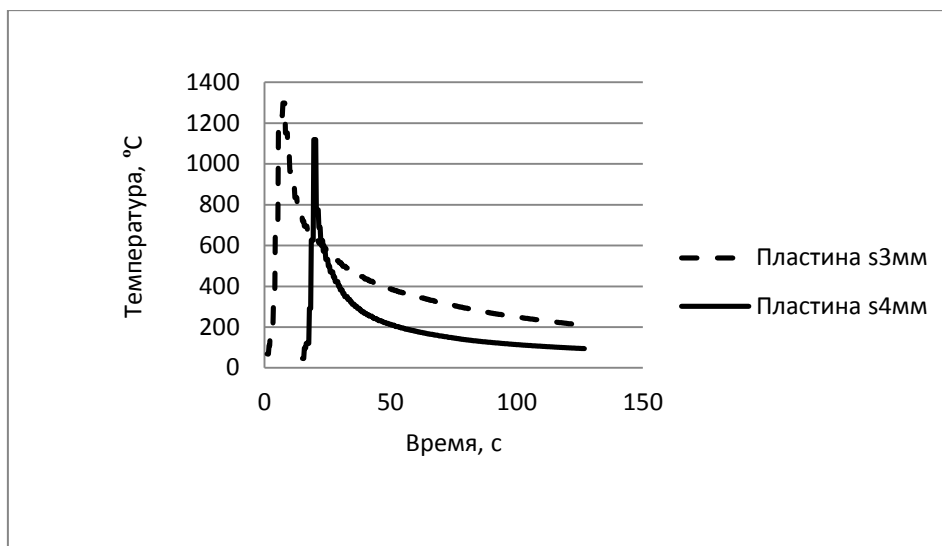


Рис. 2.1.2. Изменение температуры при плазменной закалке пластин

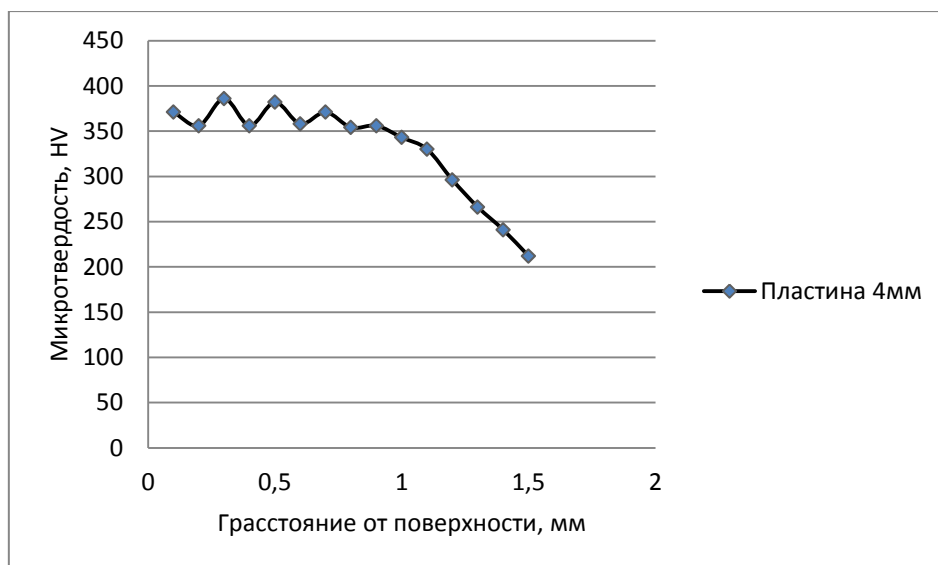


Рис. 2.1.3. Распределение микротвердости (нагрузка 500г·с) по глубине закаленной пластины (4 мм)

По рис. 2.3 видно, что наибольшее упрочнение произошло на глубине до 1мм. Здесь значения микротвердости находятся в диапазоне НВ 350...380, который почти вдвое превышает уровень микротвердости металла в исходном состоянии. Этот результат согласуется со сведениями из работы [28], в которой указано, что при скорости охлаждения  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , твердость зоны термического влияния сварного соединения из стали 45 составляет НВ375. Таким образом, плазменная закалка без

принудительного охлаждения тонкой пластины 4мм из стали 45 сопровождается неполной закалкой, но полученные значения микротвердости все же позволяют рассматривать ее как средство упрочнения.

На рис.2.1.4 и рис.2.1.5 представлены графики охлаждения пластины толщиной 4мм в областях перлитного и мартенситного превращений переохлажденного аустенита, соответственно. Скорость охлаждения является производной от функции изменения температуры с течением времени. Для ее определения построена линия тренда в прямо пропорциональной аппроксимации с выводом ее уравнения на графике. Коэффициент при аргументе  $x$  показывает значение производной, т. е. значение скорости охлаждения.

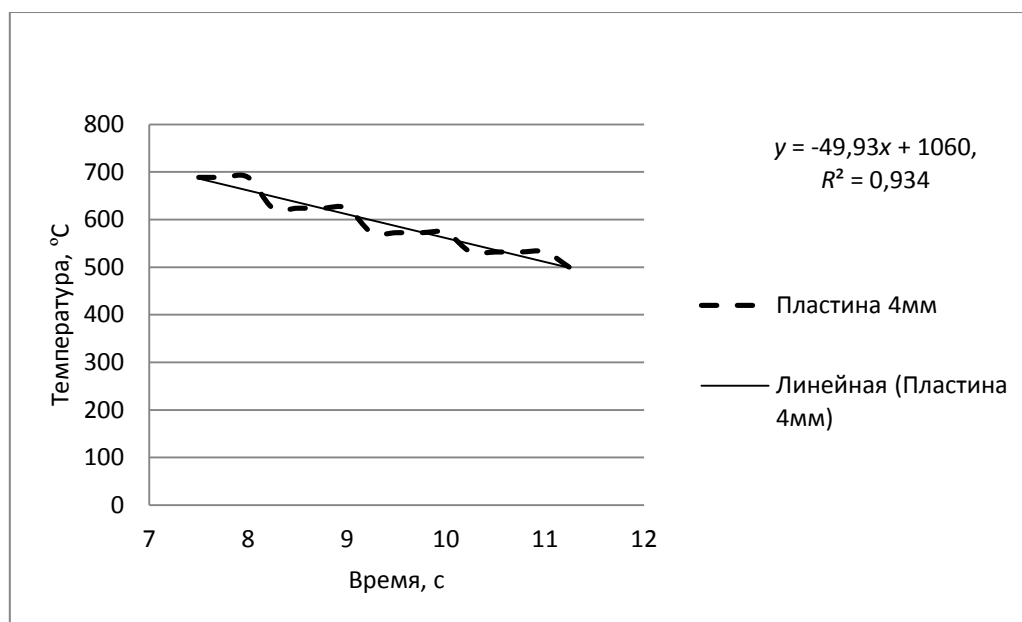


Рис. 2.1.4. Охлаждение в температурном интервале перлитного распада аустенита

На графиках видно, что скорость охлаждения в области перлитного превращения ( $49,93^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) существенно выше скорости охлаждения в области мартенситного превращения ( $10,83^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ). Первое, как ранее было сказано, способствует сохранению переохлажденного аустенита для распада в низкотемпературной области с образованием мартенсита, а второе — снижению закалочных напряжений, образующихся в результате увеличения объема при мартенситном превращении. Таким образом, подтвердились вышеприведенные результаты аналитического исследования скоростей охлаждения.

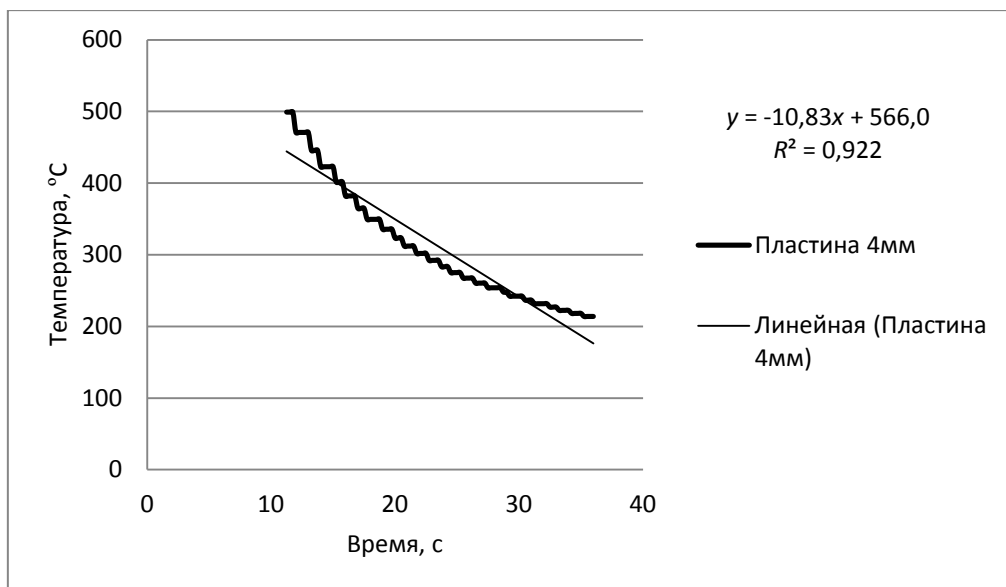


Рис. 2.1.5. Охлаждение в температурном интервале мартенситного превращения аустенита

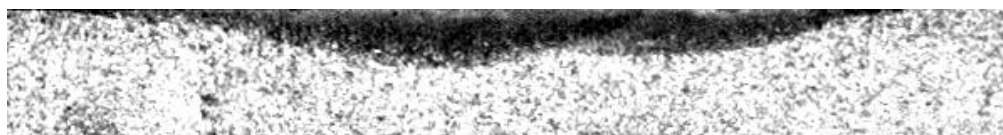
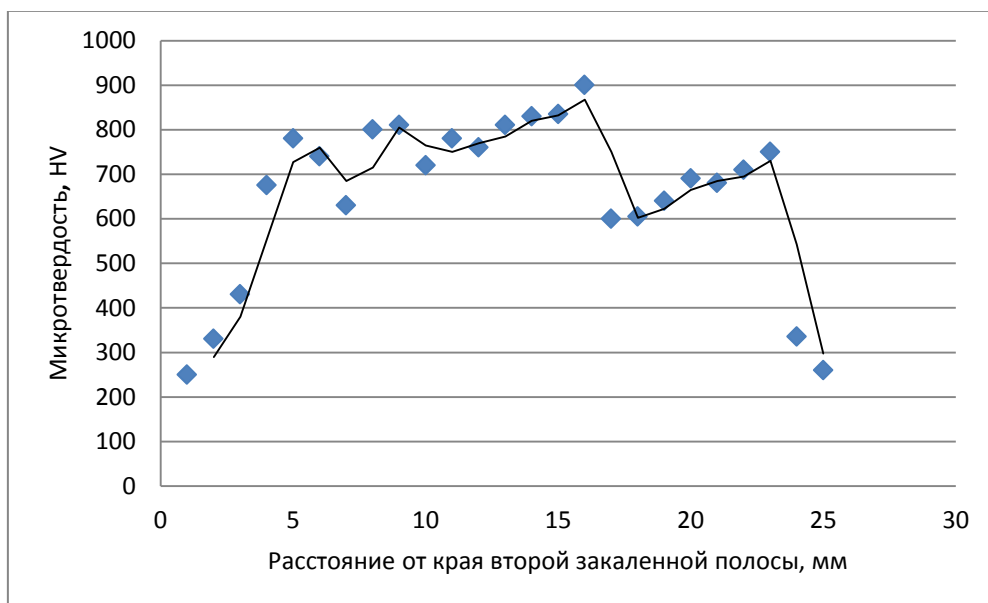


Рис. 2.1.6. Поперечное сечение образца с двумя полосами закалки плазменной дугой (внизу); распределение микротвердости (нагрузка 500г·с) на глубине от поверхности 0,1 мм (вверху)

Чтобы выявить способность к упрочнению стали 45 плазменной закалкой установкой УДГЗ-200 в условиях более быстрого охлаждения, увеличили толщину образца до 27мм и погрузили его в воду на половину высоты. На образце закалили одну за другой, с частичным перекрытием, две полосы. Измерение микротвердости производилось в поперечном сечении по ширине образца на расстоянии 0,1мм от поверхности. Результаты представлены на рис.2.1.6. Из него видно, что в зоне нагрева плазменной дугой микротвердость увеличилась более чем вдвое: приблизительно с HV300 до HV700...800. В месте перекрытия полос (двойной закалки) имеется возрастание микротвердости до HV 800...900, а в зоне термического влияния второй полосы на первую – снижение микротвердости до HV600...700 вследствие протекания отпускных процессов.

### Выводы по разделу 2.1

Скорости охлаждения при плазменной закалке установкой УДГЗ-200 массивных тел при высоких температурах (750–500°C), соответствующих области распада аустенита с образованием мягкого перлита, существенно превосходят «критические», что обеспечивает закалку без сопутствующего охлаждения водой, которое необходимо при закалке с нагревом в печах, ТВЧ или газовым пламенем. Требуемая для закалки скорость охлаждения в этом случае обеспечивается теплоотводом в холодные области тела. Полученный результат имеет важное практическое значение, ибо организация закалочного участка без подачи и сбора воды существенно проще, чем с ними.

По мере снижения температуры до области мартенситного превращения скорости охлаждения замедляются. Это благоприятствует предупреждению закалочных трещин, т.е. качественному выполнению закалки. В практике термической обработки для получения такого эффекта используют прием охлаждения «через воду в масло». Но при плазменной закалке он присутствует естественным образом, что делает закалку плазменной дугой технологически привлекательной.

При плазменной закалке пластин происходит замедление охлаждения и подавление (в той или иной мере) мартенситного превращения, но применение водяного охлаждения позволяет закаливать пластины на максимальную твердость HV700...800.

## 2.2. Исследование плазменной закалки низкоуглеродистой стали

Структура углеродистых сталей в нормализованном (горячекатаном состоянии) представляет собой чередование ферритных и перлитных зерен. В зависимости от содержания углерода меняется их соотношение. В низкоуглеродистых сталях преобладает феррит, тогда как перлитные зерна составляют небольшую долю, окаймляя ферритные зерна. При печном (медленном и длительном) нагреве углерод, сконцентрированный в перлитных зернах, успевает в результате диффузии равномерно распределиться по всему объему металла. Его концентрация по сравнению с концентрацией в зернах перлита (0,8%) уменьшается до марочного значения 0,1–0,2%. Это не позволяет низкоуглеродистым сталям эффективно упрочняться при закалке с печного нагрева. По этой причине закалка низкоуглеродистых сталей в промышленности не применяется.

Но разработка технологий плазменной закалки позволяет пересмотреть сложившиеся взгляды на упрочнение низкоуглеродистых сталей. В работе [30] показано, что с увеличением скорости нагрева температурный интервал ( $\alpha - \gamma$ ) превращения увеличивается. Исчезновение исходных фаз происходит в иной последовательности: при полном исчезновении феррита могут сохраняться участки на месте цементитных (карбидных) частиц с высокой концентрацией углерода. Эти участки в случае последующего быстрого охлаждения становятся способными воспринимать закалку, т. е. упрочняться.

Производилась проверка способности низкоуглеродистой стали к упрочнению в результате нагрева плазменной дугой установкой УДГЗ-200. Закалка выполнялась на низком токе (100А) при высокой скорости перемещения дуги, т. е. с низкой погонной энергией. Изменение структуры и твердости приведены на рис.2.2.1 (при увеличении в 500 раз).

На нем видно, что в слое нагрева плазменной дугой (верх) прослеживается наследственный характер исходной структуры (низ). Как и в исходной структуре в нем имеются зерна феррита, но более фрагментированные. На месте же перлитных зерен образовались участки-мартенсита с высокими значениями микротвердости HV905.

Полученный результат открывает новые возможности в упрочнении и повышении износостойкости корпусных частей машин и оборудо-

дования. Они, как правило, изготавливаются из низкоуглеродистых сталей и термическому упрочнению не подвергаются. По этой причине их контактирующие поверхности быстро изнашиваются и становятся причиной частых ремонтов, трудоемких и не удобных в исполнении. С появлением установки УДГЗ-200 этот недостаток может быть исправлен.

Исследовалось упрочнение установкой УДГЗ-200 литой стали 20ГЛ, применяющейся при изготовлении тележек грузовых железнодорожных вагонов [31]. Закалка бурта подпятникового места надрессорной балки производилась с поперечными колебаниями и на токе 200А, т. е. с высокой погонной энергией. Из закаленного бурта был вырезан темплет и приготовлен микрошлиф (рис.2.2.2).

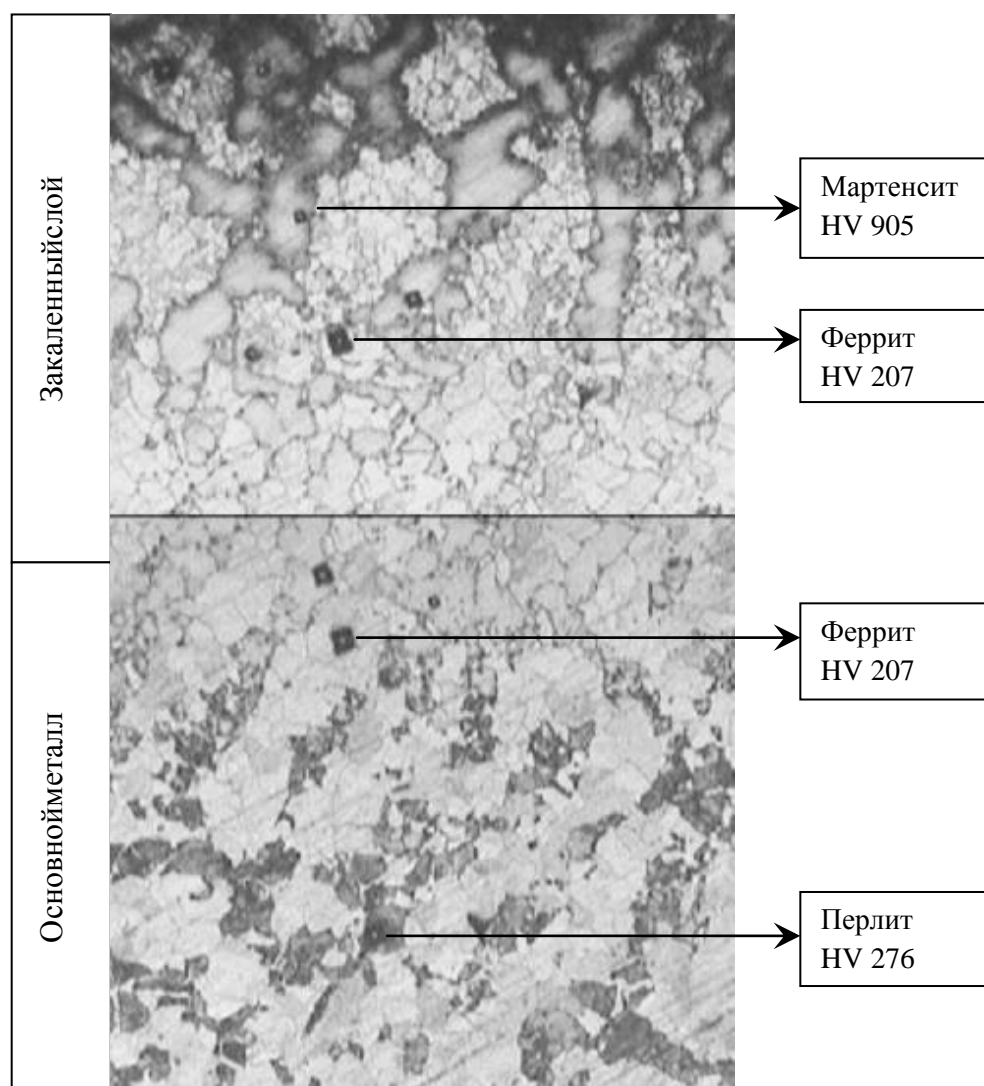


Рис.2.2.1.Микротвердость структурных составляющих низкоуглеродистой стали (0,2%С) до (внизу) и после (вверху) плазменной закалки

Использовался оптический микроскоп (*Olympus*, Япония) и зондовая нанолaborатория *NTEGRATherma* (ЗАО «НТ-МДТ», Зеленоград) в контактном режиме методом атомно-силовой микроскопии (к-АСМ) с применением зондовых датчиков NSG01 с закруглением острия 10 нм. Микротвердость измерена по методу Берковича с нагрузкой 50 мН.

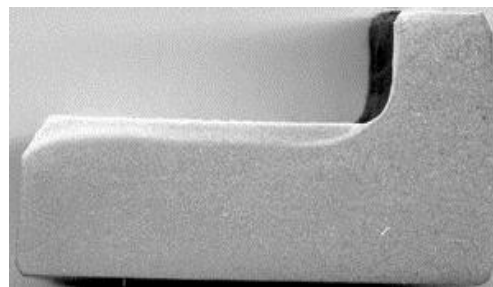


Рис. 2.2.2. Слойплазменной закалки на стали 20ГЛ

Термическое влияние от плазменного воздействия распространилось на глубину до 1,8 мм, что определили на макрошлифе с помощью травления (рис.2.2.2). Структурообразование здесь аналогично структурообразованию в зоне термического влияния сварных соединений [29]. По мере удаления от поверхности расположены характерные зоны: оплавления, перегрева, полной перекристаллизации, неполной перекристаллизации. На рис. 2.2.3 представлены некоторые из них.

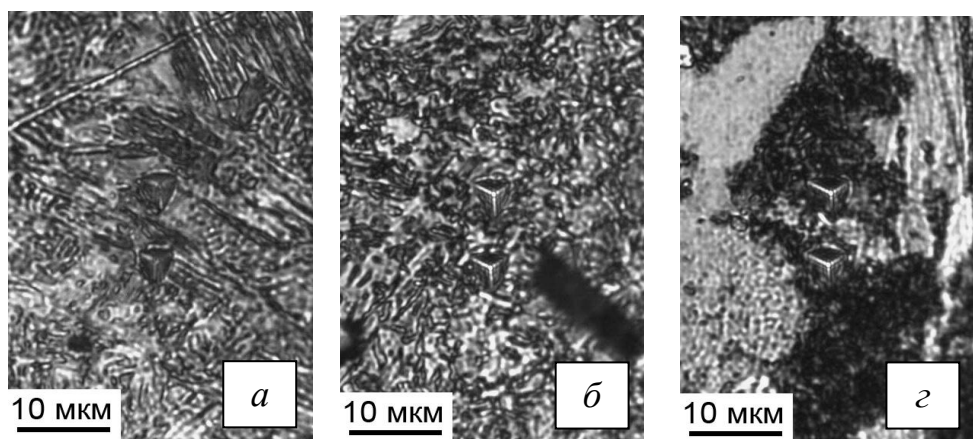


Рис. 2.2.3. Структура зон перегрева (а), полной перекристаллизации (б) и металла в исходном состоянии (с)

Основной металл имеет феррито-перлитную структуру, с размером зерен несколько десятков микрометров (рис.2.2.3, с). Ее микротвердость 2500–3500 МПа (рис.2.2.4, с); меньшие значения соответствуют ферритной составляющей, а большие – перлитной. В зоне полной перекристаллизации произошло измельчение зерна, а в зоне перегрева – укрупнение. В них стабильно высокие значения микротвердости (4500–5500 МПа), характеризующие процесс закалки. Гистограмма микротвердости зоны оплавления мало отличается от гистограммы микротвердости зоны перегрева и поэтому не приведена.



Протяженность зон оплавления (0,1 мм), перегрева (0,3 мм) и полной перекристаллизации (0,2 мм) в совокупности составляют 0,6 мм. Зона неполной перекристаллизации с переходной твердостью прослеживается до глубины 1,8 мм и имеет самую большую протяженность – 1,2 мм.

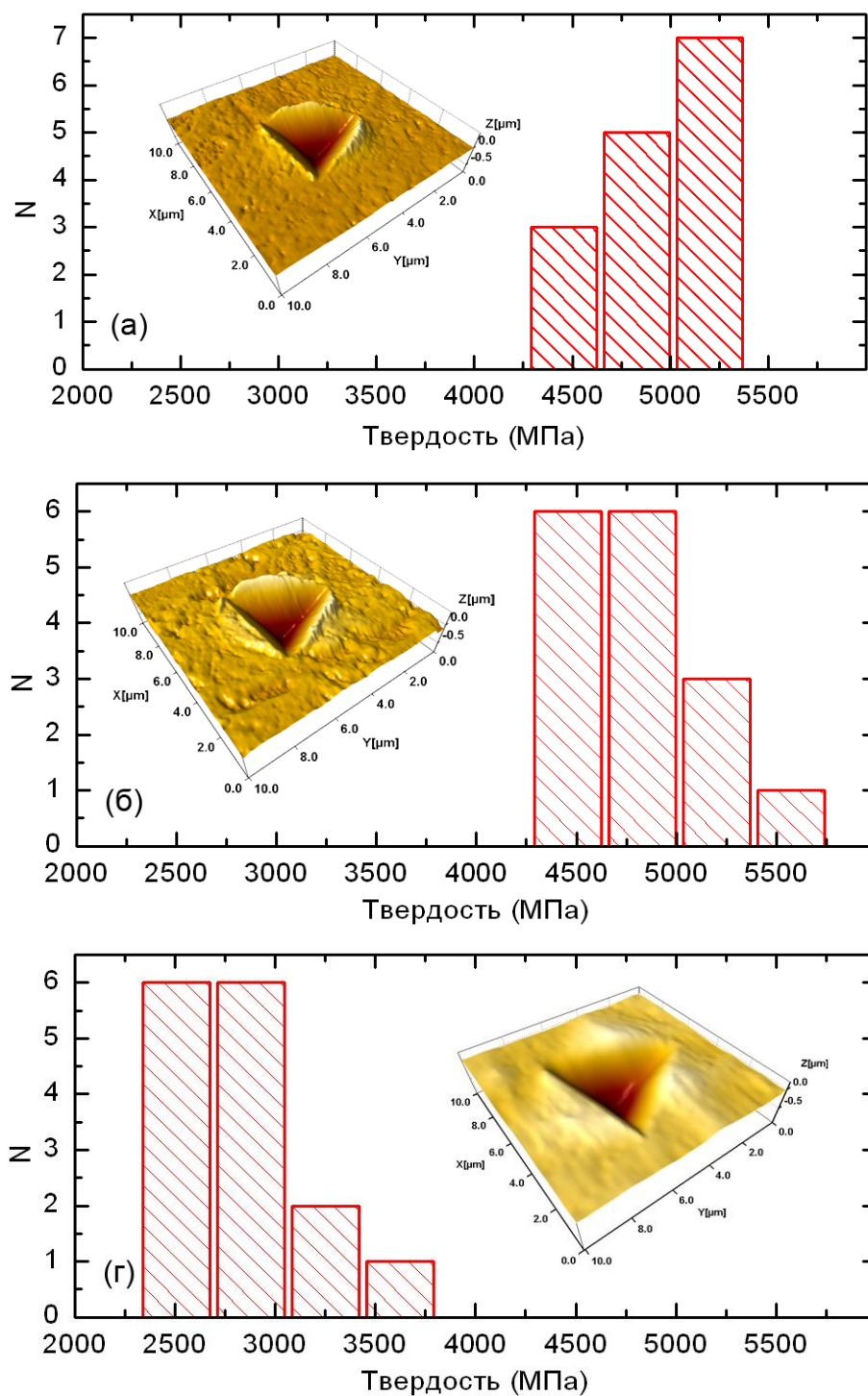


Рис. 2.2.4. Гистограмма микротвердости в зонах закаленного слоя:  
(а) перегрева, (б) полной перекристаллизации, (г) основного металла

Таблица 2.2.1

Размеры ячеек субмикронной фрагментации в зонах закаленного слоя

Зона	Размер ячеек, нм (средний размер)
оплавления	84, 96, 76, 85, 80, 70 ( <b>82</b> )
перегрева	94, 118, 120, 68, 80, 82 ( <b>94</b> )
полной перекристаллизации	92, 105, 72, 94, 111, 82 ( <b>93</b> )

На вставках на рис.2.2.4 поверхность, примыкающая к отпечаткам индентора, имеет не одинаковый рельеф. В основном металле она практически ровная. Но в зонах перегрева и полной перекристаллизации она фрагментирована. Выполненные замеры на атомно-силовом микроскопе (табл. 2.2.1) показали, что размер ячеек фрагментации наименьший в зонах оплавления, перегрева и полной перекристаллизации и в среднем составляет 82–94нм. Роснанотех критическим размером нанообъектов считает 100нм, что позволяет говорить о нанофрагментировании верхней части слоя плазменной закалки.

### Выводы по разделу 2.2

Плазменная закалка установкой УДГЗ-200 за счет высоких скоростей нагрева, обеспечивающих сохранение концентрации углерода по месту перлитных зерен, дает возможность упрочнять низкоуглеродистые стали, в промышленной практике упрочнению не подвергающиеся.

Сталь для вагонных тележек (20ГЛ) в результате плазменной закалки вдвое увеличивает микротвердость и в верхних слоях (зоны оплавления, перегрева, полной перекристаллизации) толщиной приблизительно 0,6мм получает нанофрагментирование.

## 2.3. Плазменная закалка углеродистых и легированных сталей

### Сталь 45

Производилась закалка образца толщиной 14 мм из стали 45 в ванне с водой и на токе 300Ас шагом приблизительно 10 мм. Температура образца к концу закалки увеличилась до 120°C. Из образца готовили шлиф, на котором по зоне травления в 10% растворе

$\text{HNO}_3$  в спирте изучили конфигурацию закаленного слоя. Твердость измеряли на поверхности закаленных полос стационарным твердомером ТР-5006 по шкале HRA, с переводом в значения шкалы HB. Результаты представлены на рис.2.3.1.

Твердость закаленных полос составляет HB400...450. Это не максимальная твердость, на которую закаливается сталь 45, что объясняется недостаточно высокой скоростью охлаждения небольшого образца. Максимальная твердость закалки была достигнута при закалке образца толщиной вдвое большей – 27мм (раздел 2.1). На стыках закаленных полос в силу отпускных процессов твердость снижается до HB 300.

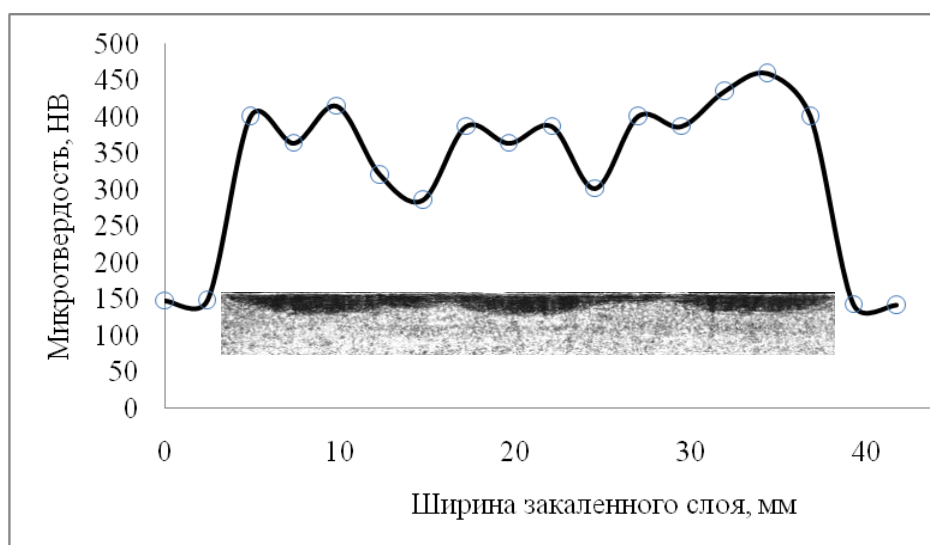


Рис.2.3.1. Макрошлиф закаленного слоя и распределение поверхностной твердости

По глубине закаленный слой неравномерен. Наибольшая глубина закалки приблизительно 2мм, снижающаяся в местах стыков полос до 0,5мм. Избежать такой неравномерности проблематично, но как показывает практический опыт (раздел 3) и не нужно, ибо задача увеличения сроков службы решается и с имеющейся разнотолщинностью закалки.

#### *Сталь 70 (рельсовая)*

Производилась закалка с поперечными колебаниями полос шириной 20–35 мм на головке рельса ( $L=1\text{м}$ , HRC 27) на участке 100 мм от торца. Предварительно место закалки шлифовали на глубину 2 мм. Из закаленного рельса вырезали темплет и приготовили шлиф(рис.2.3.2), на котором измерили твердость и глубину закаленного слоя.

Результаты приведены в табл. 2.3.1. По ней можно заключить, что при увеличении силы тока с 95А до 110 А произошло увеличение глубины закалки приблизительно в 2 раза; твердость возросла на 23 %. Последующее увеличение тока со 110 А до 140 А сопровождалось незначительным ростом толщины закаленного слоя и его твердости. При этом твердость достигла предельного для данной стали значения.

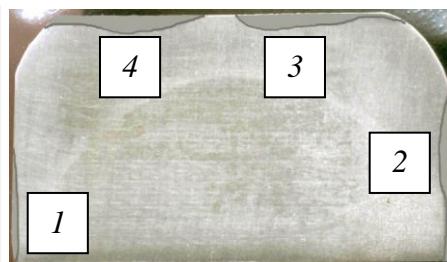


Рис.2.3.2. Головка рельса с плазменной закалкой

Таблица 2.3.1

Твердость и толщина слоя плазменной закалки на головке рельса

Полоса закалки на рис.2.3.1.	Сила тока, А	Глубина закалки (max), мм	Твердость, HRC (твердомер ИТ-5010)
1	95	1,1	49
2	110	2,0	60
3	125	2,1	64
4	140	2,2	64

Исследовалось влияние подогрева 100–300°С на свойства закаленного слоя. Закалка проводилась на токе 140А с поперечными колебаниями, как и в первом случае. Результаты приведены на рис. 2.3.3. По приведенным графикам видно, что рост температуры подогрева увеличивает толщину закаленного слоя. Пониженное значение твердости непосредственно под поверхностью отмечено многими исследователями и объясняется повышенным содержанием остаточного аустенита. Его устойчивость невысокая, при рабочих нагрузках он распадается с образованием мартенсита, поэтому к снижению износостойкости не приводит.

На машине МИ 1 по схеме трения «диск–колодка» исследовалась износостойкость рельсовой стали с плазменной закалкой [32]. Результаты приведены в табл. 2.3.2. По ним видно, что плазменная закалка снизила износ в 121 раз при трении о не упрочненную колесную сталь 65Г. При трении по более твердой наплавке Нп-18Х2Г2 износостойкость слоя плазменной закалки увеличилась в 328 раз.



Рис. 2.3.3. Влияние подогрева на микротвердость плазменной закалки головки рельса

Таблица 2.3.2

Влияние плазменной закалки на износостойкость рельсовой стали

Колодка (рельс)				Диск (колесо)			
Сталь 70	HV	Износ*, г	$K_{из}$	Сталь 65Г	HV	Износ*, г	$K_{из}$
Без закалки	280	1,50740	1,0	Без закалки	314	2,1246	1,0
С плазменной закалкой	877	0,01242	121,0	Без закалки	314	1,0208	2,1
С плазменной закалкой	877	0,0046	328,0	С наплавкой Нп-18Х2Г2	350	0,1787	11,9

\*Суммарный за 20 минут испытаний; средний по 5 парам.

Феноменальное увеличение стойкости в результате плазменной закалки объясняется сменой механизма изнашивания. Поверхности трения без упрочнения имеют возможность «схватываться», т. е., соприкасаясь выступами микронеровностей, образовывать точечные соединения адгезионного и сварного характера, которые создают абразивный фактор и ускоряют износ. По мере исключения явлений схватывания, за счет упрочнения закалкой, изнашивание приобретает характер «усталостного диспергирования» и многократно замедляется [33].

### *Сталь 38ХС*

Производилась закалка на токе 115А шестерни из конструкционной стали 38ХС, после чего был вырезан темплет, в сечении которого приготовлен шлиф и исследована микротвердость и микроструктура закаленного слоя, рис.2.3.4 и рис. 2.3.5 (при увеличении в 300 раз).

Можно отметить, что закалка произошла на глубине более 1–2мм. Твердость закаленного слоя убывает с увеличением расстояния от поверхности. Структурообразование в закаленном слое, как в случае закалки низкоуглеродистой стали (раздел 2.2), имеет наследственный характер, вследствие высокой скорости нагрева [30].

В закаленном слое сохранились фрагменты изначальной перлитной структуры с низкой микротвердостью HV 344. У поверхности их меньше; здесь преобладает аустенитно-мартенситная структура с высокой твердостью HV 783. По мере углубления доля аустенито-мартенсита уменьшается с понижением его твердости до HV 668...568. Исходная структура стали представляет феррито-перлит с микротвердостью перлита HV 239.

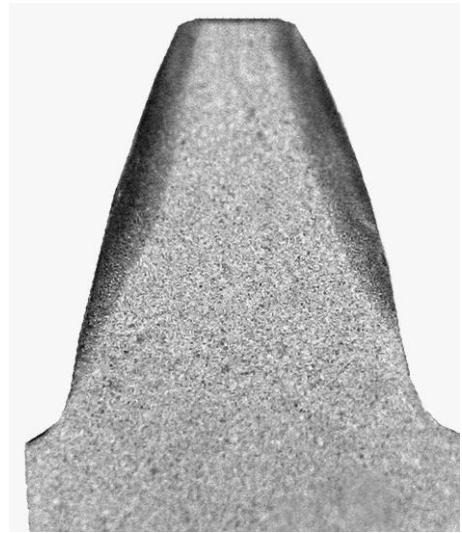


Рис. 2.3.4. Макрошлиф закаленного зуба

### *Стали 5ХНМ и 5ХВ2С*

Данные стали относятся к штамповым, и применяются в упрочненном состоянии с объемной закалкой и отпуском на твердость приблизительно HRC45. Поэтому плазменная закалка производилась на образцах в нормализованном и упрочненном состояниях. В обоих случаях твердость увеличилась до одного и того же уровня. Но в поперечном сечении предварительно упрочненных образцов на границе слоя плазменной закалки имелось снижение твердости ниже начального уровня (рис.2.3.6). Это связано с нагревом до температур высокого отпуска. Можно отметить, что разупрочнение стали 5ХНМ произошло в большей мере (до HV280), чем стали 5ХВ2С (до HV400), что указывает на более высокую жаропрочность последней.

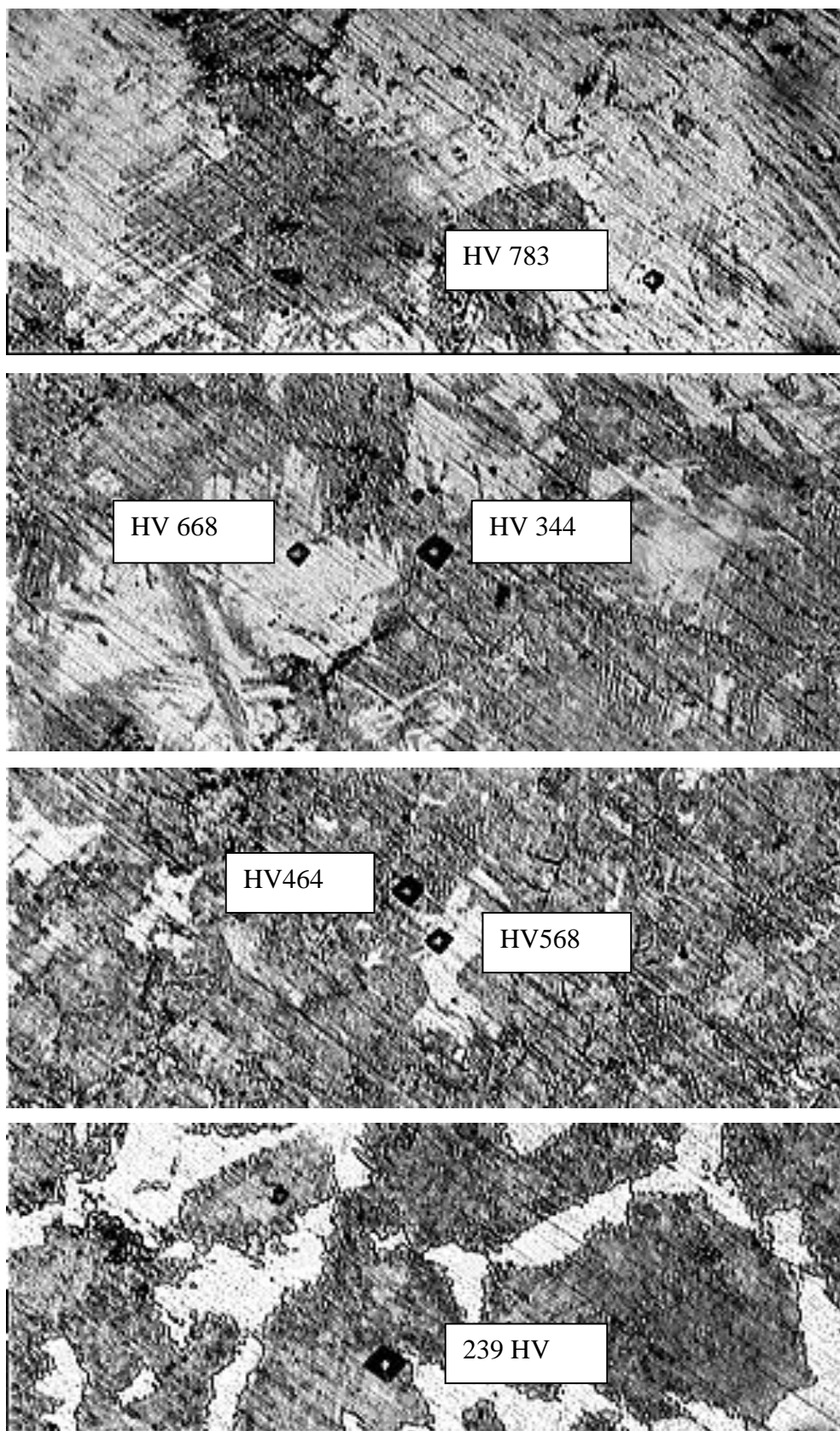


Рис.2.3.5. Микроструктура слоя плазменной закалки на стали 38ХС  
(внизу основной металл)





Рис.2.3.6. Распределение микротвердости по глубине плазменной закалки на образцах, прошедших предварительную объемную закалку с отпуском

### Сталь 20X13

При закалке хромистой стали 20X13 на токе 220А наблюдалось заметное оплавление поверхности. Понижением величины тока полностью избежать оплавления не удалось (рис. 2.3.7), что отличает ее от углеродистых сталей, закаливающихся без оплавления. Вероятно, это связано с различием свойств окисных пленок.



Рис.2.3.7. Оплавление поверхности при плазменной закалке стали 20X13

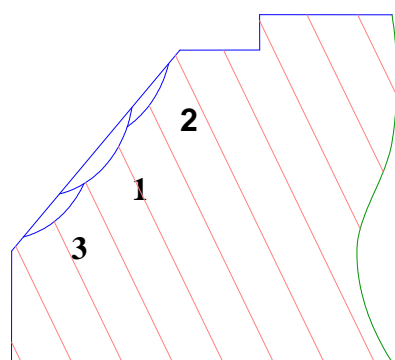


Рис. 2.3.8. Макрошлиф образца с плазменной закалкой стали 20X13

Глубина оплавления составила 0,23мм, а поднятие над поверхностью – 0,16мм.

В качестве оптимального выбрано значение тока 180А, при котором достаточно высокая производительность закалки, а повреждения поверхности оплавлением существенно меньше, чем при токе 220А.

На образце (рис. 2.3.8) закалили с шагом 7 мм три полосы и вырезали из него темплет, на поперечном сечении которого приготовили шлиф и изучили микротвердость закаленного слоя (рис. 2.3.9). В поверхностном, толщиной около 0,55 мм, слое имеется



зона оплавления, характеризующаяся столбчато-дендритной структурой и высокой микротвердостью. Глубже лежит структура, состоящая из мартенсита и остаточного аустенита. На глубине более 1,5 мм микротвердость снижается с переходом к микротвердости основного металла ~ HV250. Можно отметить, что глубина упрочненного слоя на двух участках закаленных в последнюю очередь больше, чем на первом участке, что объясняется разогревом образца во время закалки.

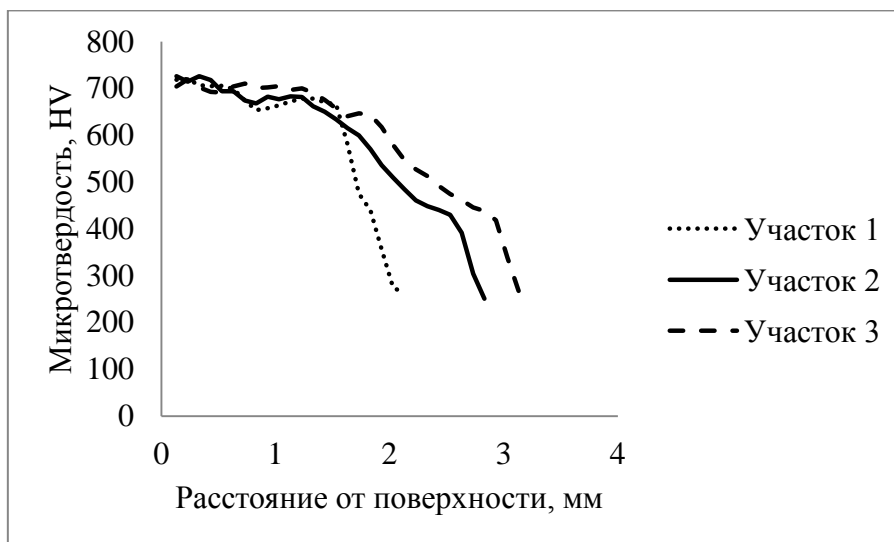


Рис. 2.3.9. Линейная аппроксимация распределения микротвердости на закаленных участках на рис.2.3.7

Глубина повреждений, вызванных неизбежным оплавлением поверхности, составляет не более 0,3 мм, что существенно меньше общей толщины упрочнения (~1,5 мм), и может удаляться финишной шлифовкой без опасения потери при этом закаленного слоя.

### Выводы по разделу 2.3

Углеродистые и легированные стали под воздействием плазменной закалки существенно увеличивают твердость. Плазменная закалка рельсовой стали 70 снизила износ более чем в сто раз. При этом не только не произошло ускорения, но наблюдалось замедление износа сопрягаемого образца. Таким образом, часто встречающееся мнение механиков, что упрочнение одной детали вызывает ускоренное изнашивание сопрягаемой с ней, по меньшей мере, не всегда верно.

## 2.4. Плазменная закалка чугуна

Легированные чугуны типа ЧНХМД используются при изготовлении штампового инструмента, в том числе вкладышей штампов для формовки труб большого диаметра. Исследовалась возможность упрочнения их плазменной закалкой. На образце размером 35×305×155 мм закалили дорожки на токах 100, 140 и 180А, после чего вырезали темплеты, на которых приготовили шлифы, измерили ширину и глубину закаленных дорожек, шероховатость и твердость поверхностей. Использовали: переносной ультразвуковой твердомер МЕТ-УД и измеритель шероховатости. Результаты приведены на рис. 2.4.1 и в табл.2.4.1.

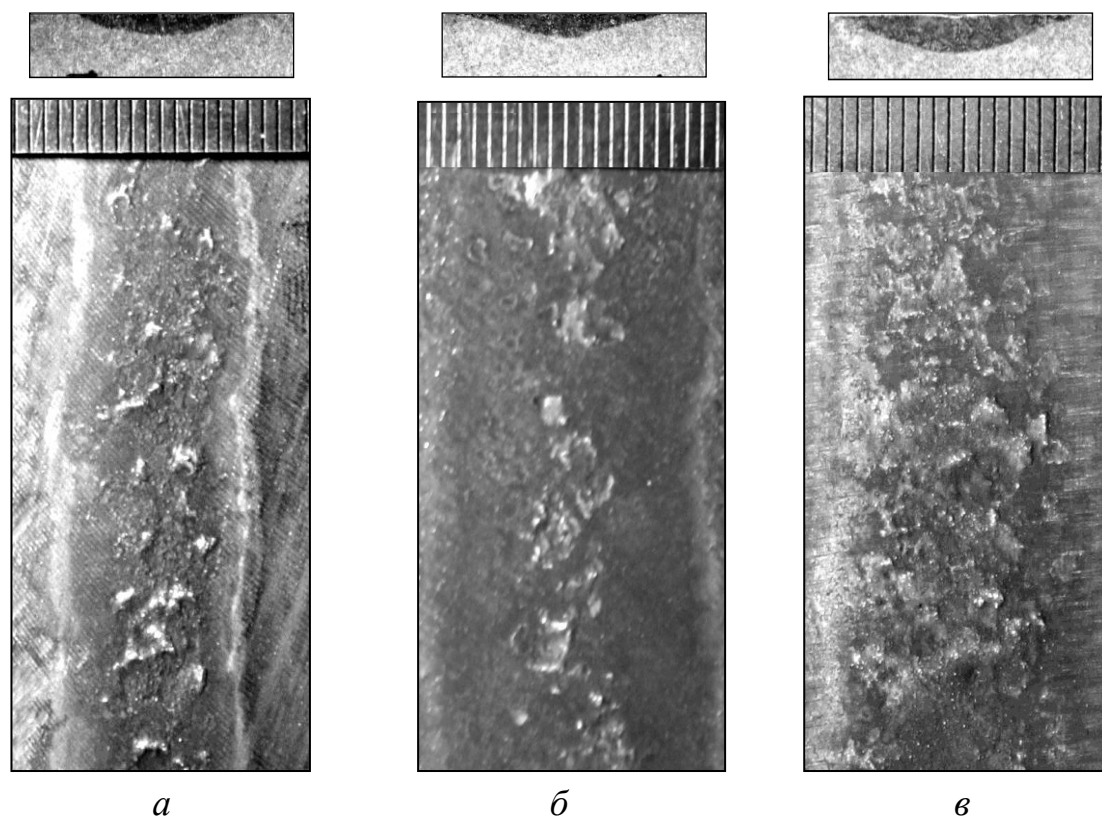


Рис. 2.4.1. Поперечный срез(вверху) и вид закаленных полос с миллиметровой линейкой (внизу). Ток закалки, А: *a* – 100, *б* – 140, *в* – 180

Анализируя их, можно отметить, что закалка чугуна ЧНХМД происходит с заметным оплавлением поверхности: высота оплавления – до 0,3 мм, глубина – до 0,1 мм. Твердость поверхности в результате плазменной закалки увеличилась с HB345 до HB550. Увеличение тока закалки со 100А до 180А сопровождается ростом глубины закалки с 1,3 мм до

2,1мм, при этом увеличение тока до 140А существенного влияния на глубину закалки не оказало. Ширина закаленных полос увеличивалась пропорционально росту тока.

Таблица 2.4.1

Параметры полос плазменной закалки на чугунах ЧНХМД

Ток, А	Твердость, НВ (МЕТ-УД)		Ширина закалки, мм	Глубина закалки, мм	Шероховатость, <i>Ra</i>	
	до закалки	после закалки			до закалки	после закалки
100	345	550	11	1,3	5,0	10,0
140			12	1,4		
180			15	2,1		

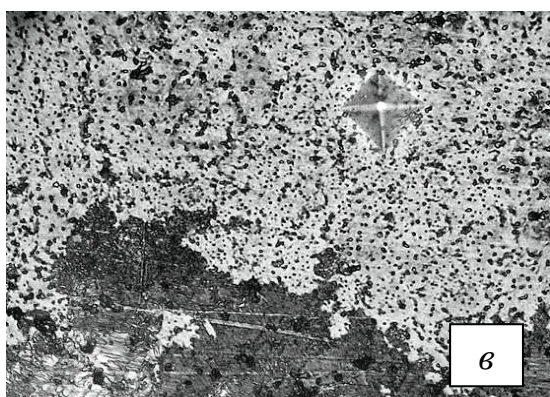
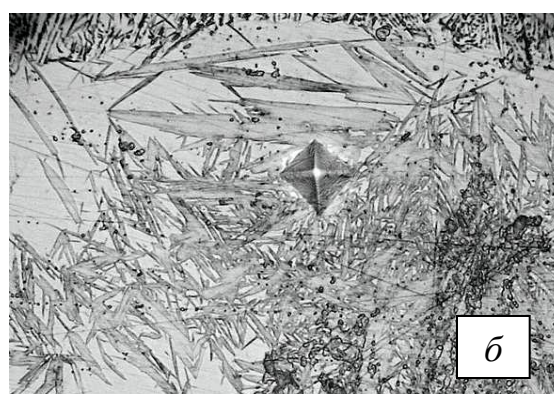
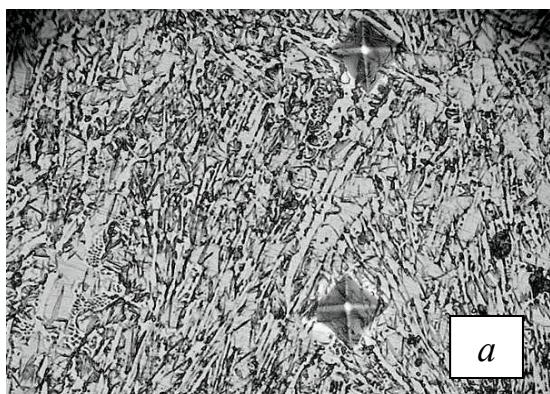


Рис.2.4.2. Микроструктура закаленного слоя в чугуне по мере удаления от поверхности:

*а* – дисперсный ледобурит в зоне оплавления, HV1247; *б* – мартенсито-аустенит, HV 1010; *в* – мартенсит с включениями графита, HV861; *г* – перлит с частицами графита, HV343

На рис. 2.4.2(при увеличении в 450 раз) приведены характерные структуры и значения микротвердости закаленного слоя по мере удаления от поверхности, полученные на микроскопе «NEOPHOT-21» и микротвердомере ПМТ-3М с нагрузкой 100г·с. Можно отметить высокие значения микротвердости по всей толщине закаленного слоя с образованием дисперсного ледебурита, аустенито-мартенсита и мартенсита.

Клинья вагонных тележек изготавливаются из серого чугуна СЧ25, при эксплуатации получают быстрый износ и нуждаются в частых заменах. Из зарубежной практики известно, что применение высокопрочного чугуна с изотермической закалкой на порядок снижает износ клиньев. Высокопрочный чугун (ВЧ60, твердость HB300) получают модификацией при разливке магнием. Изотермическая закалка в расплаве селитры повышает его твердость до HB400. Поскольку процесс закалки в расплаве селитры вреден здоровью и экологии, то рассматривалась возможность его замены плазменной закалкой.

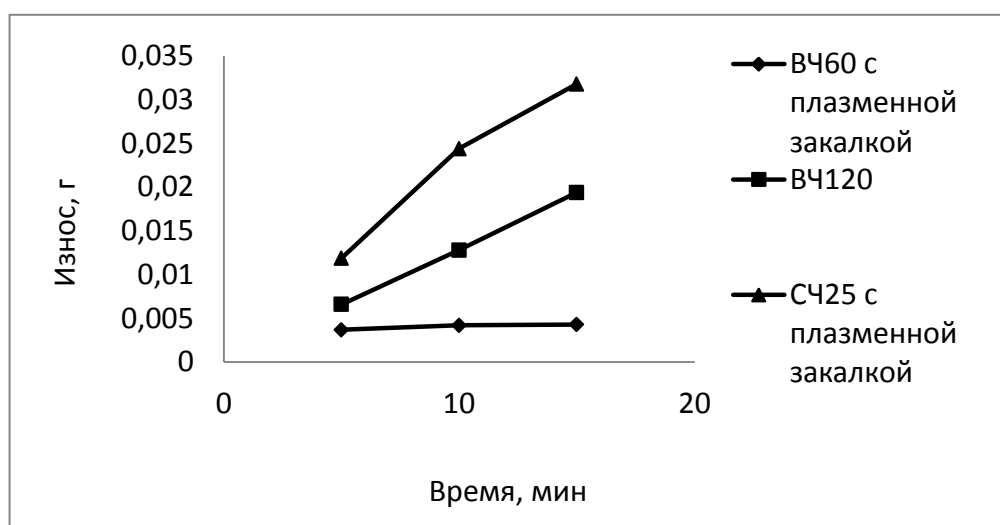


Рис. 2.4.3. Износ чугунных колодок при трении о диск из стали 30ХГСА на машине трения МИ 1

Для испытаний на износостойкость на машине трения по схеме «диск–колодка» были приготовлены колодки из различного чугуна: ВЧ120, ВЧ60, СЧ25, а диски – из стали 30ХГСА (HB330). Половина колодок была упрочнена плазменной закалкой. Испытания проводились без смазки 4 цикла по 5 мин. Результаты представлены на рис. 2.4.3 [34].

Чугун ВЧ60 без плазменной закалки не выдержал даже одного цикла, получив износ 5 г на глубину 3 мм, т. е. больше обычного в 250 раз. Еще больше был износ серого чугуна СЧ25, поэтому эти результаты на графике не приведены. Наименьший износ получил чугун ВЧ60 с плазменной закалкой, который оказался меньше износа чугуна ВЧ120 на 50%. Износ серого чугуна СЧ25 с плазменной закалкой, хотя и больше износа ВЧ120 на 84%, но не катастрофичен как износ СЧ25 без плазменной закалки. Микроструктура закаленного чугуна представляет собой плохо травящийся слой с включениями пластинчатого (в СЧ25) и шаровидного (в ВЧ60) графита (рис. 2.4.4, при увеличении в 100 раз).

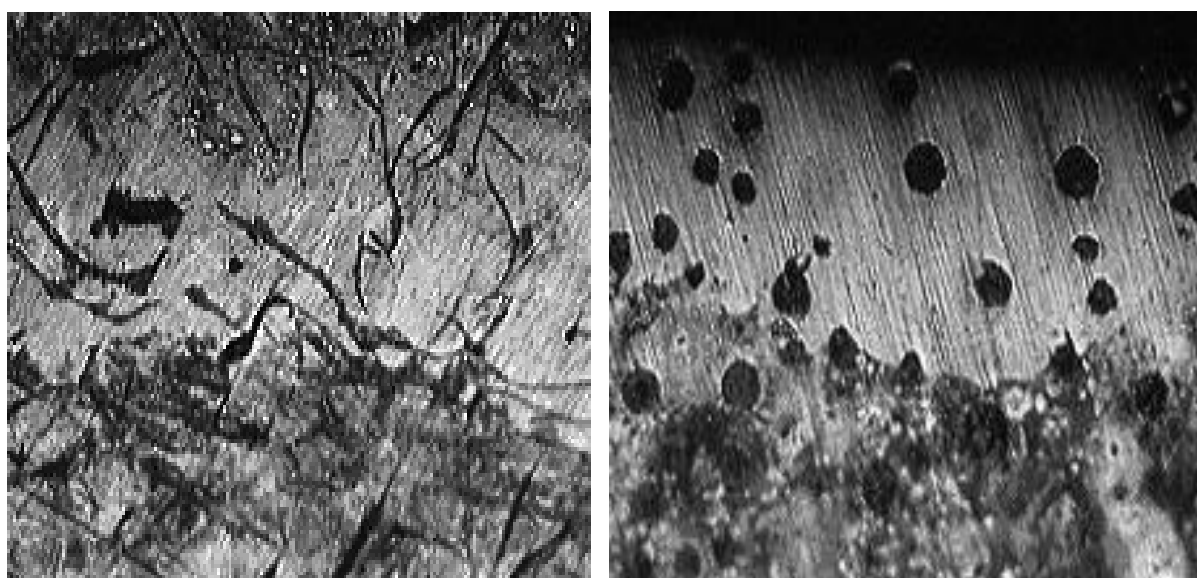


Рис. 2.4.4. Микроструктура слоя плазменной закалки на чугуне СЧ25 (слева) и ВЧ60 (справа)

### Выводы по разделу 2.4

Полученные результаты позволяют рекомендовать плазменную закалку чугуна для упрочнения штампового инструмента и клиньев вагонной тележки. Особенно она может быть полезна в вагонных депо с приписанным вагонным парком. Технология ручной плазменной закалки соответствует характеру работ в депо, а достигаемое ею упрочнение существенно уменьшит расход клиньев и ремонтные простои вагонов.

### **3. ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ УДГЗ-200 В ПРОИЗВОДСТВЕ**

### 3.1. Закалка зубчатых, шлицевых и иных поверхностей

#### *Зубчатые и шлицевые соединения*

Размеры закалочной горелки установки УДГЗ-200 позволяют закалывать зубья шестерен с модулем  $m \geq 5$ . Закалка производится по боковой поверхности зуба (рис.3.1.1). Впадины между зубьями не закаливаются, т. к. туда нет доступа плазменной дуге. При закалке ТВЧ это является недостатком, вызывающим поломки зубьев при эксплуатации. Но плазменная закалка боковых поверхности к поломкам не приводит, т. к. производится последовательно, тогда как закалка ТВЧ – одновременно по всему профилю, с наведением высоких остаточных напряжений.



Рис.3.1.1. Плазменная закалка зубьев по боковой поверхности



Рис.3.1.2. Плазменная закалка зубьев (справа) исключила поломки имевшие место при закалке ТВЧ (слева)

На рис.3.1.2 показаны приводные шестерни ж.-д. локомотивов. Они эксплуатируются в открытой передаче и быстро изнашиваются. Для снижения износа зубья закаливаются ТВЧ, но при эксплуатации происходит их выкрашивание. Применение плазменной закалки выкрашивание зубьев исключило [35].

Производилась закалка установкой УДГЗ-200 зубчатых колес (сталь 35Л,  $z - 90$ ,  $m - 24$ ) канатного барабана сталеразливочного крана грузоподъемностью 225т. Сравнительные испытания показали, что срок службы зубчатых колес в результате закалки увеличился с 6 мес. до 17 мес., т. е. в 2,8 раза. Эта технология применяется на металлургическом комбинате с 2004г. по настоящее время. Подобный результат получен также при плазменной закалке зубчатого венца (сталь 35ГЛ) рудоусреднительной машины. Из-за больших размеров венца (диаметр



~ 6 м), закалка производилась на шихтовом дворе под открытым небом (рис. 3.1.3), и позволила отработать упрочненному венцу три срока. Возможность производить работы не только в цехе, но и в монтажных условиях – важное преимущество установки УДГЗ-200.

Машина для кантовки слитков при нагреве в методических печах перемещается по зубчатой ( $m = 24$ ) рейке. Засоренность участка песком и шлаком приводит к быстрому износу зубьев. Рейка, состоящая из 13 частей по ~ 2,3 м, заменялась раз в год, но на нагруженных участках отдельные части рейки в течение года заменялись многократно. Попытка упрочнить рейку закалкой ТВЧ оказалась неудачной. Значительные деформации создали затруднения при монтаже, а в ходе эксплуатации зубья стали быстро выкрашиваться. Чтобы снизить затраты, перешли на изготовление частей рейки отливкой. Однако с появлением установки УДГЗ-200 было принято решение повторить опыт с упрочнением рейки закалкой. Части рейки изготовили из поковок (сталь 45) и упрочнили зубья плазменной закалкой. После 3-годовой эксплуатации из 13 частей рейки заменили только 2 части, а остальные оставались в работе. Таким образом, плазменная закалка увеличила стойкость зубчатой рейки, эксплуатирующейся в условиях засорения песком и шлаком, более чем в 3 раза.



Рис.3.1.3. Плазменная закалка зубчатого венца на шихтовом дворе под открытым небом

Производилась плазменная закалка конических шестерен механизма привода смешивающих «бегунов», применяющихся в литейном производстве. Наблюдения показали, что при 4-кратной наработке износ шестерен не превысил 10–20%.

Приводные шестерни ( $m = 10$ ,  $z = 16$ ) в открытой передаче укладчика, работающего с вагоноопрокидывателем в агломерационном производстве, изнашивались в течении одной недели. Плазменная закалка увеличила твердость с HB250 до HB520; наработка при этом возросла до 4 недель, т.е. в 4 раза.

Эджерные валы собственного производства для импортной колесо-прокатной линии на металлургическом комбинате уступали по сроку

службы валам зарубежной поставки. Причиной был быстрый износ шлицов приводного конца(рис.3.1.4, *а*). Для его снижения выполнили плазменную закалку, что увеличило твердость (сталь 5ХНМ) с HRC35 до HRC55. В результате упрочненный вал превзошел стойкость серийных валов в 2,7 раза, и на 30% – стойкость импортных валов. Таким образом, плазменная закалка установкой УДГЗ-200 проявила себя как импорто-замещающая технология.

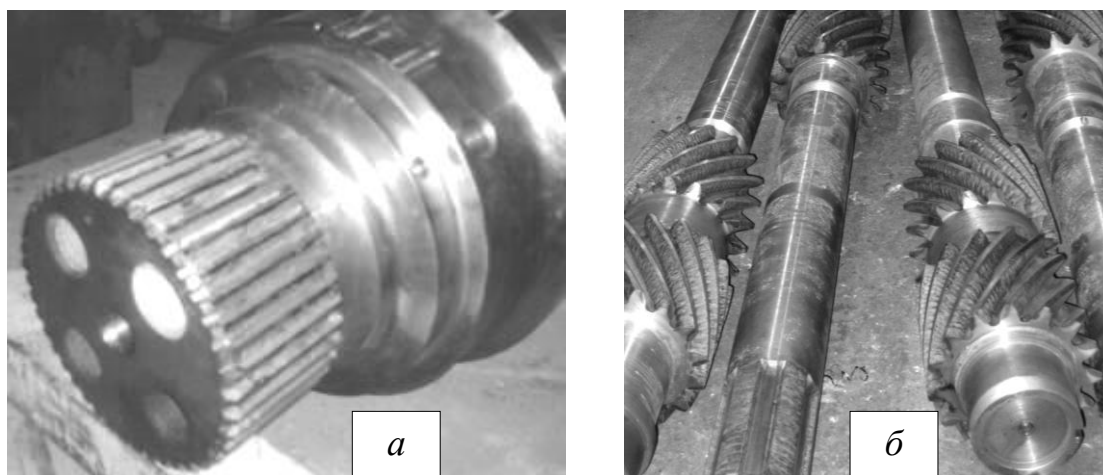


Рис. 3.1.4. Крупногабаритные детали с плазменной закалкой:  
*а* – эджерные валы, *б* –валы-шестерни

В приводе прокатного стана «300» крутящий момент передается валкам через шлицевые муфты (сталь 45), срок службы которых не превышал 3-х месяцев. Упрочнение шлицов плазменной закалкой увеличило твердость с HB190 до HB480. Производственные испытания показали, что после 2-кратной наработки они сохранились в работоспособном состоянии с износом менее 10%.

Плазменная закалка удобна для упрочнения труднодоступных поверхностей в единичном или мелкосерийном производстве. Для закалки ТВЧ небольшой партии крупногабаритных валов-шестерней (рис.3.1.4, *б*) потребовалась бы не соразмерно большая подготовка производства: поиск незагруженного дефицитного оборудования (установка ТВЧ с манипулятором), изготовление специальных индукторов. Эти проблемы сняла ручная закалка плазменной установкой УДГЗ-200. С ее помощью помимо шевронных зубьев были закалены и шлицевые



(приводные) окончания валов. Таким образом, дорогостоящее изделие получило упрочнение всех ответственных поверхностей.

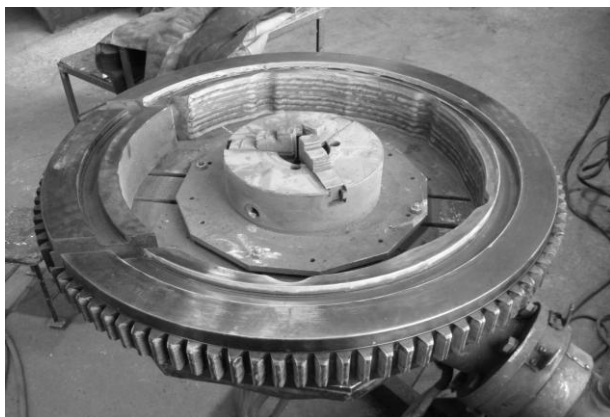


Рис. 3.1.5. Шестерня поворотная патрона бурового станка с плазменной закалкой



Рис. 3.1.6. Автоматическая закалка правильного вала установкой УДГЗ-200

На рис.3.1.5 показана поворотная шестерня патрона бурового станка. На ней плазменной закалкой упрочнены не только зубья, но и внутренняя поверхность, создающая через ролики ( $\varnothing 40\text{мм}$ ) усилие сжатия. Отечественному производителю гидропатронов не удалось подобрать альтернативного варианта, позволяющего заменить плазменную закалку, что еще раз подчеркивает уникальные возможности установки УДГЗ-200.

### *Правильные валки*

Рабочим инструментом косовалковой машины для правки горячекатаных бесшовных труб  $\varnothing 245\text{--}530$  являются валки из стали 9Х, массой около 3т. После годичной эксплуатации во время капитальных ремонтов производится переточка бочки валков на ремонтный размер. При уменьшении диаметра валков в центре седла с  $\varnothing 750\text{мм}$  до  $\varnothing 730\text{ мм}$  твердость поверхности снижается с HRC 48...58 (требования чертежа) до HRC 37...45 и становится не пригодной для эксплуатации.

Попытки восстановить твердость повторной закалкой ТВЧ не привели к успеху; валки в ходе закалки давали трещины. В связи с этим были начаты эксперименты по восстановлению твердости валков плазменной закалкой. Валок и закалочную горелку закрепили в наплавочной установке (рис.3.1.6), что позволило вести закалку в автоматическом

режиме. Производственные испытания показали, что закаленные плазменной дугой валки успешно выдерживают плановый межремонтный срок эксплуатации. Закалка валков проводится с 2008г.

### «Погоны»

Это обоймы крупногабаритного, опорного шарикового подшипника (рис. 3.1.7). В данном случае они были изготовлены из коррозионно-стойкой стали 20Х13. Их диаметр составлял от  $\varnothing 608$  мм до  $\varnothing 2354$  мм.

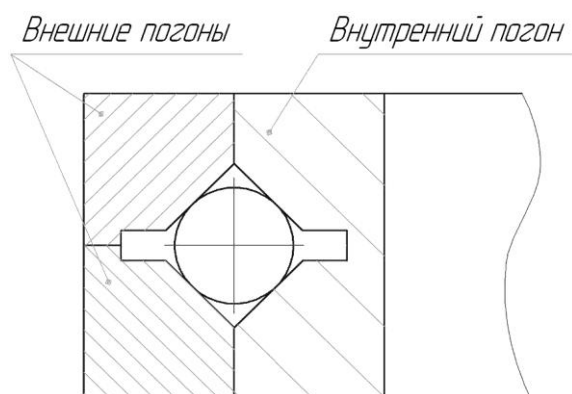


Рис. 3.1.7.Схема  
«погонного» подшипника

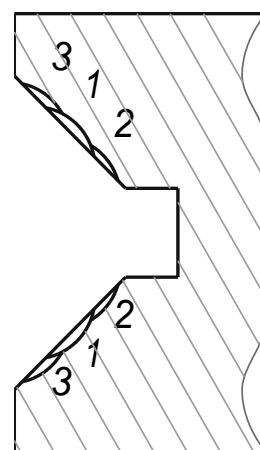


Рис. 3.1.8.Схема плазменной закалки «погонов»;  
1–3 – полосы закалки

Металлографическими исследованиями (раздел 2.3) установлено, что глубина поверхностных повреждений в результате оплавления составляет до 0,3мм, а глубина закалки – не менее 1,5мм. Руководствуясь этим, припуск на чистовую шлифовку после плазменной закалки установили в размере 0,5мм.

Поскольку «погоны» представляют собой кольца с невысокой жесткостью, то был разработан порядок закалки тремя полосами (рис. 3.1.8), не допускающий перегрева. В противном случае было бы возможно коробление с нарушением плоскостности и появлением овальности.

На плите размещалось несколько «погон», каждый из которых размечался на 16 сегментов(рис. 3.1.9). Сначала на всех погонах закаливалась центральная полоса на одном сегменте. Затем – центральная полоса на сегменте противоположном закаленному сегменту, и так пооче-

редно на всех сегментах. В таком же порядке закачивались крайние полосы. После закалки измеряли твердость переносным ультразвуковым прибором УЗИТ-3. Ее значения: HRC56 – на закаленных дорожках; HRC46 – на стыках дорожек.

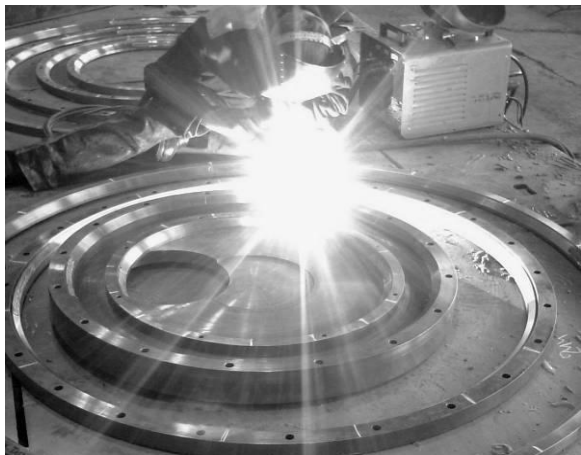


Рис. 3.1.9. Ручная плазменная закалка «погон»

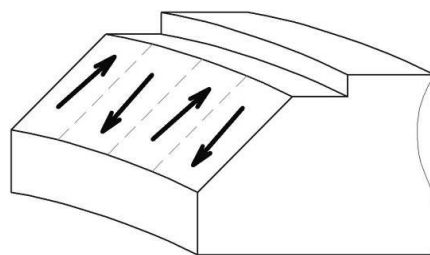


Рис.3.1.10. Закалка «погон» с поперечными перемещениями горелки

Закаленные «погоны» после макетной сборки были испытаны обкаткой под нагрузкой 14т·с. В собранном виде в погонах находятся шары (~280шт.), диаметром  $\varnothing 38\text{мм}$ . Испытания не выдержало менее 10 % «погон», на которых образовались кольцевые канавки глубиной ~0,1мм. Осмотр показал, что на этих погонах между закаленными полосами имелись незакаленные промежутки шириной 2–4 мм. Повторную закалку после шлифовки на ремонтный размер вели с поперечными колебаниями горелки на всю ширину поверхности погона (рис. 3.1.10). За один прием закачивали один сектор; порядок закалки секторов сохранился прежний. Этим достигнуто существенное снижение трудоемкости, за счет сокращения межоперационных переходов, но оно не привело к появлению недопустимых деформаций.

### 3.2. Закалка крановых рельс и колес, канатных шкивов, тормозных барабанов, роликов рольгангов

Подкрановые рельсы подвержены статическим и динамическим нагрузкам от движения моста крана и его тележки. В основном изнашиваются опорная и боковая поверхности головки рельса. Для продления

срока службы рельсов применяется объемная закалка головки рельса, увеличивающая твердость с HRC22 до HRC35 на глубине ~15 мм, но плазменная закалка увеличивает твердость до более высоких значений HRC50–60.

Проводились производственные испытания в металлургическом цехе. Обычно срок службы рельс Р18 на тележке мульдамагнитных кранов грузоподъемностью 10 т до замены составляет от 6 до 8 месяцев; основная причина их замены – большой износ головки рельса. Упрочнению

плазменной закалкой подверглись опорная и боковые поверхности головки рельса. Закалка проходила прямо в металлургическом цехе. Замеры твердости рельс твердомером МЕТ-УД выявили увеличение твердости с HRC35 до HRC55.

Уже в самом начале испытаний (приблизительно после 3 месяцев) обнаружилась разница в изнашивании закаленных и не закаленных рельсов (рис. 3.2.1). Через 12 месяцев эксплуатации закаленные рельсы оставались в работе, тогда как не закаленные рельсы были заменены, как и обычно, через 8 месяцев. После 15 месяцев эксплуатации, т. е. после двойного срока службы, закаленные рельсы были сняты, но не из-за износа, а из-за усталостного отрыва головки рельса от подошвы. В дальнейшем, чтобы не допускать подобных разрушений, очевидно, следует применять более тяжелые рельсы, чем Р18.

При передаче электросварных труб большого диаметра  $\varnothing 530\text{--}820$  с участка сварки на участок отделки используются скоростные передаточные тележки, передвигающиеся по рельсам типа А55, поставляемым из Германии. Их срок службы составлял 3–4 месяца, а на наиболее нагруженных участках ускорения и торможения – 2–6 недель. После того, как произвели плазменную закалку рельсов (увеличение твердости с HB160 до HB430) и тележечных колес срок службы рельсов возрос до 4–5 лет, т. е. в 12–20 раз.

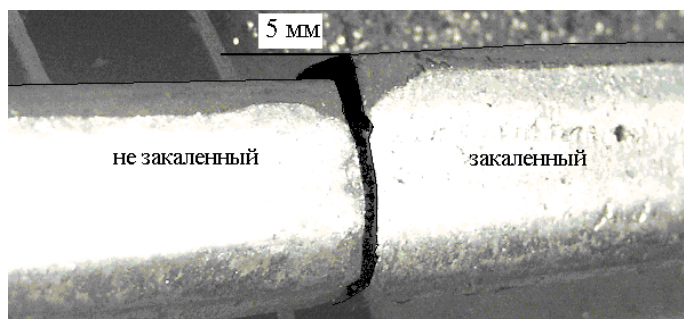


Рис. 3.2.1. Износ закаленного и незакаленного рельса после равного срока эксплуатации

На автоматической линии по изготовлению осей колесных пар для ж.-д. вагонов направляющие рельсы Р18 достигли предельного износа. Эксплуатация велась в ожидании, что уменьшение высоты направляющих остановит производство. Обстоятельства не позволяли оперативно выполнить их замену, поэтому для замедления изнашивания провели плазменную закалку. Было установлено, что без плазменной закалки износ рельсов на 3,2мм произошел при объеме производства 200 тыс.шт. осей. После плазменной закалки износ составил 0,9мм после выпуска 474тыс.шт. осей. Таким образом, износостойкостьувеличилась в 8 раз.

В конце 90-х гг. малогабаритный плазмотрон, разработанный для упрочнения ручьев прокатных валков [14], был применен для закалки сходных по конфигурации гребней колес ж.-д. локомотивов в Горно-обогатительном комбинате. Закалка выполняется на фрезерном станке КЖ-20 без выкатки колесных пар из-под локомотива, после их ремонтной проточки. По наблюдениям за темпом изнашивания была принята периодичность закалки раз в 2 месяца, что позволило снизить годовой расход колесных бандажей в 1,8 раза. При этом за время пробега износом удаляется весь закаленный слой, благодаря чему не возникает затруднений с ремонтной проточкой.

На рис.3.2.2 представлены ролики рольгангов, крановые колеса, тормозной шкив, закаленные установкой УДГЗ-200 в автоматическом режиме. Рост их срока службы, как и в предыдущих случаях, вполне ощутимый и зависит от условий эксплуатации.

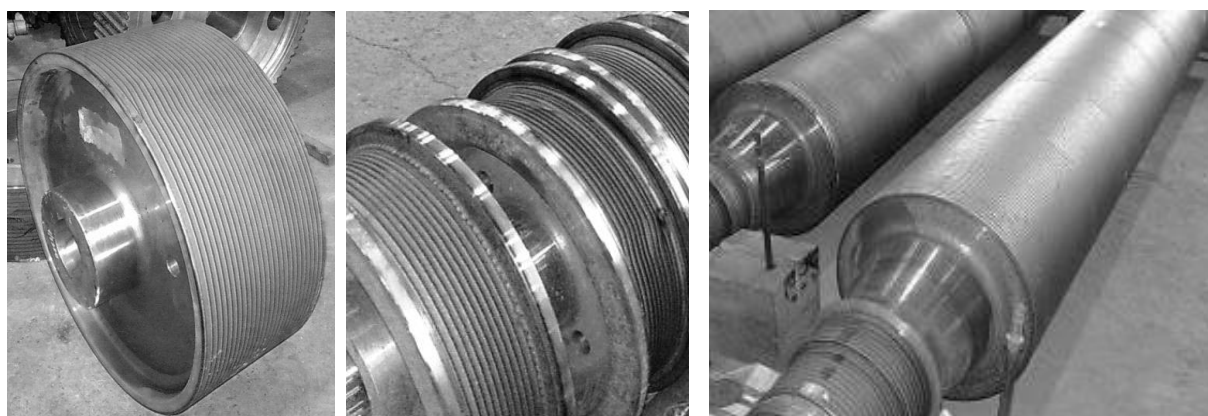


Рис. 3.2.2. Тормозной шкив, крановые колеса, ролики рольганга с плазменной закалкой

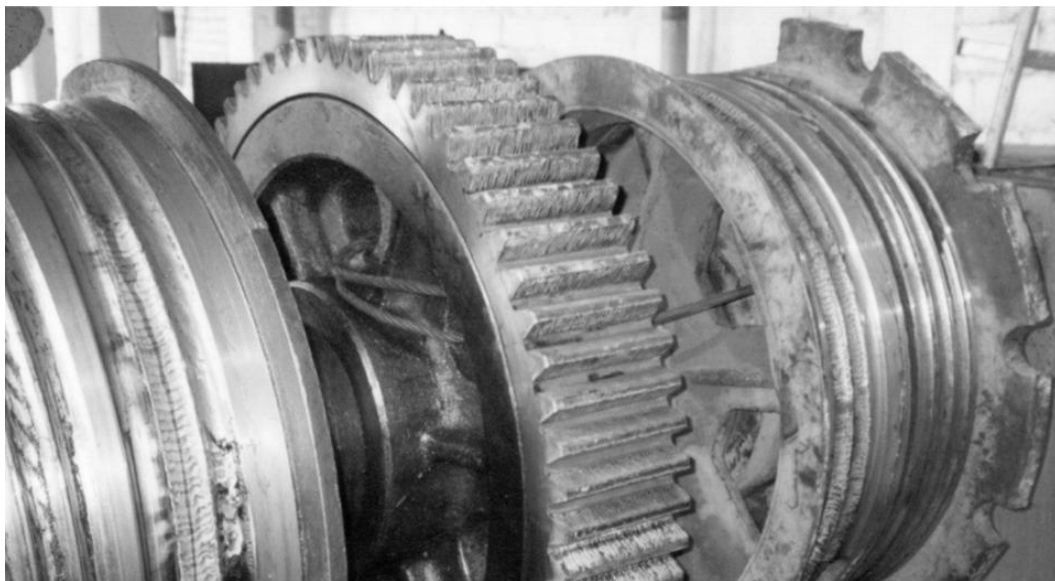


Рис.3.2.3. Канатные барабаны и приводная шестерня редуктора «напора» экскаватора ЭКГ-8А, упрочненные плазменной закалкой

Приводная шестерня и ручки канатных барабанов механизма «напора» карьерного экскаватора ЭКГ-8А относятся к наиболее изнашиваемым. Причем, у барабана изнашивается всего 1,5 витка, чаще всего участвующих в работе «навивки». По мере износа шестерни заменяются, а ручки канатного барабана протачиваются на ремонтный размер.

Применение плазменной закалки (рис.3.2.3) канатных ручьев и зубьев шестерни существенно, в 3 раза, увеличили межремонтный ресурс этого ответственного узла. Кроме того, освоена наплавка изношенных ручьев, которая после проточки, также подвергается плазменной закалке. Перечисленные меры дали не только значительное сокращение затрат на ремонты и, что особенно важно, сократили продолжительность ремонтов, увеличили фонд рабочего времени дорогостоящего оборудования.

### 3.3. Закалка штампов

На вагоностроительном заводе в связи с переходом на более прочную категорию металлопроката увеличился расход штампов. В связи с этим выполнены исследования по упрочнению его ручной плазменной закалкой на установке УДГЗ-200. Результаты представлены в табл. 3.3.1.

Таблица 3.3.1

Коэффициент износостойкости вырубных штампов с плазменной закалкой

№	Вид операции, увеличение твердости от плаз- менной закалки	Материал штампа	Толщина детали, мм	$K_{изн}$
1	Вырубка с формовкой HRC 54 → HRC 65	У8А	3	1,9
2	Холодная вырубка HRC 48 → HRC 65	У8А	12	1,5
3	Холодная вырубка HRC 52 → HRC 60	8Х3	6	3,5
4	Горячая вырубка HRC 50 → HRC 65	X12М	12	1,6
5	Горячая вырубка HRC 52 → HRC 60	5ХВ2С	10	5,3

Из табл. 3.3.1 видно, что большинство штампов в состоянии объемной закалки имели твердость на уровне HRC 50, которая в результате плазменной закалки увеличивалась до уровня HRC 60. Это обеспечило рост износостойкости в 1,5–5,3 раза. Наблюдения последующих лет показали, что в среднем по цеху сокращение годового расхода штампов составляет 2,7 раза [36].

Производилась плазменная закалка чугуновых штампов (вкладышей) формовки труб большого диаметра на трубопрокатном заводе. В литом состоянии их твердость составляет HRC30, которая газоплазменной закалкой поднималась до HRC50. Применение плазменной закалки (рис.3.3.2) увеличило твердость до HRC60, а стойкость – в 3 раза [37]. При этом уменьшился износ вкладышей, что устранило брак по наружной поверхности труб. Дефицит вкладышей заставлял их вырабатывать до состояния, когда они начинали оставлять недопустимые повреждения на трубах. С применением плазменной закалки вкладыши перестали быть причиной появления брака.

Были достигнуты положительные результаты от применения плазменной закалки на многотонных штампах из стали 5ХНМ, в том числе на штампах со сложным профилем рабочей фигуры, пример которой показан на рис.3.3.3. В 90-х гг. для получения более высокой изно-

состояйки их стали отпускать после объемной закалки при пониженной температуре. Это увеличило твердость и снизило износ, но сказалоь на прочности штампов – они начали раскалываться. Тогда для устранения расколов вернулись к более высокой температуре отпуска, а для увеличения износостойкости с 2006г. стали применять поверхностную плазменную закалку.



Рис. 3.3.1. Плазменная закалка формовочного штампа



Рис. 3.3.2. Штамп с плазменной закалкой фигуры сложного профиля

Многие штампы имеют длительный цикл изготовления с разрезанием на небольшие части для объемной закалки в печах и последующей трудоемкой подгонкой закаленных фрагментов в единое целое. Был проведен эксперимент, когда объемную закалку заменили плазменной (рис.3.3.4). Ширина закаленных дорожек – 10мм (HRC56–65, сталь X12M и чугун ХФ), полосы отпуска – 2мм (HRC46...57). Доля участков: закаленные дорожки – 95%, полосы отпуска – 0,5%, незакаленные участки (пропуски, HRC22...32) – 0,5%.



Рис. 3.3.3. Фрагмент разрезного штампа после плазменной закалки

Это позволило избежать подгонки закаленных частей (приблизительно 30% от общей трудоемкости изготовления штампа), т. к. они сра-



зу были выполнены по чертежным размерам. На штампе было изготовлено более 70 тыс. изделий (задняя балка крыши автомобиля ВАЗ), и он находился в рабочем состоянии. При этом трудоемкость ремонтных «за-чисток», за счет сокращения их частоты и продолжительности, уменьшилась на порядок (приблизительно 10 раз).

Подобный результат получен при плазменной закалке матриц правого и левого переднего крыла автомобиля ГАЗ (рис. 3.3.5), изготовленных из легированного чугуна, %: С – 2,9; Si – 1,8; Mn – 1,0; Cr – 0,4; Cu – 1,2, увеличившей твердость с HRC24 до HRC50...64.



Рис. 3.3.4. Матрица с плазменной закалкой прижимного контура



Рис. 3.3.5. Матрица для формовки трубных тройников большого диаметра

На Заводе монтажных заготовок три комплекта матриц для изготовления штамповарных трубных тройников Ø530, 720, 820 мм (сталь 30ГСЛ) из-за низкой твердости катастрофически быстро, после приблизительно 50 штамповок, пришли в негодность. Плазменная закалка позволила восстановить работоспособность матриц: выдержав втрое большее количество штамповок, они остаются в исправности

### 3.4. Закалка корпусов оборудования и защитных накладок

#### *Корпусные детали вагонной тележки*

Быстрый износ вагонной тележки является причиной частых де-повских ремонтов и простоев вагонов. С целью их сокращения выполнены исследования, в том числе в 2006–2009 гг. на Экспериментальном ж.-д. кольце ОАО «ВНИИЖТ» проведены испытания вагонов с деталями

(рис.3.4.1) вагонной тележки 18-100, упрочненными плазменной закалкой установкой УДГЗ-200.

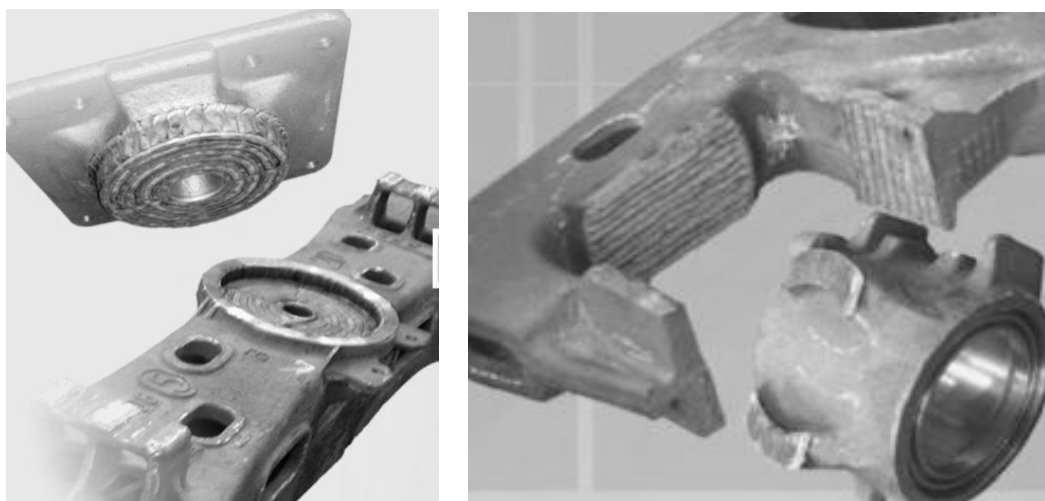


Рис.3.4.1. Узлы вагонной тележки с плазменной закалкой:  
пятник-подпятник (слева), буксовый проем (справа)

Получены следующие характеристики износа после 500 тыс. км в перерасчете на общесетевой пробег.

- ✓ На бурте подпятника:
  - 0,20 мм/100 тыс. км – в продольном направлении,
  - 0,02 мм/100 тыс. км – в поперечном направлении.
- ✓ На опорной поверхности подпятника:
  - без износа (только следы приработки).
- ✓ На упорной поверхности пятника:
  - 0,12 мм/100 тыс. км – в продольном направлении,
  - 0,04 мм/100 тыс. км – в поперечном направлении.
- ✓ На опорной поверхности пятника:
  - без износа (только следы приработки).
- ✓ На поверхностях букс и буксовых проемов:
  - без износа (только следы приработки).

Интенсивность износа в серийных вагонных тележках (1 мм/100 тыс. км) более чем на порядок превышает полученную при испытаниях, поэтому плазменная закалка рекомендована ОАО «ВНИИЖТ» к серийному применению в производстве. Применение ее позволит увеличить гарантийный пробег вагонов по меньшей мере до

500 тыс. км, что вдвое больше, чем у серийных без плазменной закали. При этом удорожание от плазменной закали составляет не более 20%.

Пресс «9000» колесопрокатной линии пущен был в эксплуатацию в 2005 г. К 2008 г. нижняя его поперечина получила неравномерный износ и ее, используя мобильный обрабатывающий комплекс, осаждали фрезеровкой на 7мм.

В 2010 г. выравнивание повторили. При этом для замедления износа выполнили поверхностное упрочнение плазменной закалкой установкой УДГЗ-200 (рис. 3.4.2). В результате твердость рабочей поверхности нижней поперечины (сталь 20ГЛ) возросла с HB180 до HB400. Одновременно закалили ответную поверхность лежащей на ней опорной плиты (сталь 38ХГН), твердость которой повысилась с HB 230 до HRC 520.

На прессе «70000» в нижней поперечине (сталь 25ХНЗМФА) образовалась выработка (износ) глубиной до 25 мм и диаметром до Ø1100мм. Ее восстановление было произведено полуавтоматической наплавкой: нижний слой – проволокой Св-08Г2С, верхние слои (до 8 шт.) – Св-18ХГС. Для предупреждения при наплавке трещин производился предварительный подогрев, и велась проковка наплавленных валиков сразу после наложения каждого. Твердость после наплавки составила HB270, что позволило оперативно провести фрезеровку шаботно-фрезерным передвижным комплексом. После механообработки выполнили плазменную закалку установкой УДГЗ-200 с увеличением твердости до HB 420.



Рис.3.4.2. Нижняя поперечина прессы после закали

#### *Защитные накладки*

Поверхности корпусных частей машин и оборудования, подвергающиеся износу, защищают различного рода накладками, примеры которых приведены на рис.3.4.3. Их объединяет то, что ранее они употреблялись или без упрочнения, или их упрочнение обходилось слишком доро-

го, но плазменная закалка установкой УДГЗ-200 сделала упрочнение этих деталей доступным.



Рис.3.4.3. Защитные листы с плазменной закалкой

Накладки, которыми защищают места контакта на клетях прокатных станков, называют «лицевыми планками». Они вдвое уменьшают частоту трудоемких ремонтных фрезеровок клеток, но сами требуют частой замены.

Производилась плазменная закалка (рис. 3.4.4) лицевых планок (3270×400×60мм, сталь 45) пильгер-станков и мест под планками на клетях (сталь 35Л). Твердость в результате закалки увеличилась с ~ НВ200 до ~ НВ 500, а наработка в 4 раза – планок, и в 2 раза – клеток. При этом существенно в 4–5 раз уменьшился износ и тех и других, что за счет снижения зазоров уменьшило динамические (ударные) нагрузки при работе.

С подобным эффектом была произведена для тех же пильгер-станков плазменная закалка плит, защищающих от быстрого износа устройство для смены валков, работающее с высокими ударными нагрузками.



Рис. 3.4.4. Плазменная закалка  
лицевой планки

Стенки приемного бункера пресс-ножниц для резки металлолома на мерные отрезки облицовывают защитными листами из стали 65Г. Перед установкой в бункере их для придания износостойкости закаливают. Поскольку при закалке листы получают не только высокую твердость (HRC 55), но и деформа-

ции, то их фрезеруют. Но, чтобы сделать фрезеровку возможной, предварительно отпуском снижают твердость до HRC 35, чем лишают их части износостойкости.

Условия проведения очередного ремонта бункера не оставляли времени на подготовку защитных листов. Поэтому было решено смонтировать их без объемной закалки и фрезеровки. Последнее обстоятельство позволило с экономией закупить листы меньшей толщины. Чтобы их срок службы не уменьшился, решили прибегнуть к плазменной закалке, которую оперативно выполнили прямо на стенках бункера. Ни один способ, кроме закалки установкой УДГЗ-200, не позволяет подобным образом производить поверхностное упрочнение по месту эксплуатации.



Рис. 3.4.5. Бункер пресс-ножниц, футерованный листами с плазменной закалкой

В результате закалки (рис.3.4.5) твердость поверхности листов увеличилась до HRC55, но сердцевина осталась вязкой. Это сохранило листы в течение базового срока эксплуатации (5 лет) без поломок (расколов), которые имели место у листов с объемной закалкой, и дало возможность оставить листы для дальнейшей эксплуатации. Таким образом, к экономии, полученной при облицовке бункера, добавилась экономия от переноса капитального ремонта бункера на отдаленный срок.

### Выводы по разделу 3

Плазменная закалка зубьев шестерен и шлицевых соединений производится только по боковой поверхности зубьев, без упрочнения впадин между ними. При закалке ТВЧ это вызывает поломки зубьев при эксплуатации, но в данном случае их не происходит, т. к. закалка выполняется не одновременно по всей длине зуба с наведением высоких остаточных напряжений, а последовательно, что сопровождается протеканием отпускных процессов от автоподогрева. Зубчатые и шлицевые соединения, упрочненные плазменной закалкой, показали многократное увеличение сроков эксплуатации.

Повторная закалка ТВЧ, проточенных на ремонтный размер валков, приводит к трещинам, тогда как плазменная закалка обеспечивает им второй срок эксплуатации.

Плазменная закалка оказалась способной обеспечить надлежащую работоспособность поверхностей, работающих в режиме шариковых и роликовых подшипников.

Упрочнение плазменной закалкой рельсов, используемых в заводских условиях, показало многократное увеличение их сроков службы, что также относится к ручьям канатных барабанов, крановым колесам, тормозным шкивам и т. п.

Ручная плазменная закалка установкой УДГЗ-200 сделала доступным упрочнение корпусных частей оборудования, изготавливаемых из низкоуглеродистых сталей, традиционно считающихся не закаливаемыми. Детали вагонной тележки с плазменной закалкой даже после двойного срока эксплуатации не получили износа, кроме потертостей, характеризующих процесс приработки.

Во многих описанных случаях ручная плазменная закалка установкой УДГЗ-200 оказывалась единственно возможным к употреблению способом поверхностного упрочнения. Она применялась по месту эксплуатации закаливаемых изделий и даже под открытым небом. *С помощью установки УДГЗ-200 закаливается то, что ранее было невозможно подвергнуть закалке.*

## 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

### 4.1. Экономия от уменьшения расхода запасных частей и ремонтных услуг

Плазменная закалка за счет снижения износа сокращает потребность в запасных частях, а значит и в услугах ремонтных бригад. Эта экономия ремонтного фонда наиболее очевидная часть той выгоды, которую приносят работы по плазменной закалке.

Условие получения прибыли от сокращения расходов на покупку запчастей выглядит следующим образом:

$$K^{из} \geq K^{уд} \quad (4.1)$$

где  $K^{из} = T^y / T^{ny}$  – коэффициент износостойкости, показывает во сколько раз упрочненная деталь долговечнее ( $T$  – срок службы) не упрочненной,  
 $K^{уд} = Ц^y / Ц^{ny}$  – коэффициент удорожания, показывает во сколько раз цена упрочненной детали больше цены не упрочненной.

#### Пример

Колесо крановое стоимостью 50 тыс.руб. имеет около 4 тыс. см<sup>2</sup> рабочих поверхностей, закалка которых обойдется в 8 тыс. руб., а коэффициент удорожания составит:  $58/50 = 1,16$ .

Если принять коэффициент износостойкости 1,8 (как при упрочнении гребней локомотивов, см. разд. 3.2), то условие (4.1) будет выполнено с большим запасом:  $1,8 \geq 1,16$ .

Экономия при этом составит:  $50 \cdot 1,8 - (50 + 8) = 90 - 58 = 32$  тыс. руб., а эффективность вложений в плазменную закалку – 4 руб. экономии на 1 руб. затрат.

Когда условие (4.1) не выполняется, не следует сразу отказываться от применения упрочнения. Если достигнуто продление сроков службы ( $K^{из} \geq 1$ ), вероятно, произойдет сокращение числа ремонтов, а значит сокращение расходов на оплату ремонтных услуг, которое может покрыть расходы на плазменную закалку.

## 4.2. Экономия от сокращения ремонтных простоев

Работа во время, высвобожденное от ремонтов, позволяет увеличить объемы производства без капитальных вложений и увеличения численности персонала, и за счет этого получать дополнительную прибыль, чему имеется замечательный исторический пример.

Основоположник научной металлургии В.Е. Грум-Гржимайло после окончания института (конец XIX века) работал на Демидовских заводах Урала. Оборудование Нижнесалдинского завода было изношено, и он занялся организацией, как сам называл, «правильных ремонтов», обеспечивающих длительную межремонтную эксплуатацию. Когда ремонтные простои были сокращены, оказалось, что они были равны рабочему времени, ибо выпуск продукции удвоился при той же численности работников. Кроме того, расход топлива для паровых машин и металлургических печей снизился в 4 раза. Прибыль возросла столь существенно, что сохранила заводы от распродажи «с молотка» за карточный долг хозяина. Это позволяет заключить, что сокращение ремонтных простоев дало доход сопоставимый со стоимостью завода.

В случаях, когда потребность в увеличении выпуска продукции отсутствует, результатом сокращения ремонтов остается снижение себестоимости и высвобождение оборудования для иного использования. На ткацкой фабрике шло освоение выпуска нового вида продукции – вафельных полотенец. По сравнению с типовой продукцией – миткалем, вафельные полотенца более плотные, что увеличило нагрузку на станки, и они стали чаще выходить из строя. Поэтому для выполнения плана было выделено три участка, по 16 станков на каждом участке. Однако после проведения работы по адаптации станков к новым нагрузкам, число отказов и простоев станков сократилось настолько, что дало возможность план выпуска выполнять не тремя, а только одним участком станков.

Эксплуатация упрочненного, а значит не изношенного, оборудования не приводит к появлению или росту брака, перерасходу электроэнергии и смазки.

Расчет экономического эффекта [38] от упрочнения плазменной закалкой должен производиться с учетом всех перечисленных его источников (рис.4.1).





Рис.4.1. Структура прибыли (экономии) от повышения износостойкости

Расчетная формула совокупного экономического эффекта от упрочнения плазменной закалкой выглядит следующим образом:

$$\Xi = (C_{\text{зап}}^1 + C_{\text{рем}}^1 + C_{\text{ос.пр}}^1) - (C_{\text{зап}}^2 + C_{\text{рем}}^2 + C_{\text{ос.пр}}^2), (4.2)$$

где  $C$  – стоимость: запчастей ( $_{\text{зап}}$ ), ремонтных услуг ( $_{\text{рем}}$ ), потерь в основном производстве ( $_{\text{ос.пр}}$ ) без применения ( $^1$ ) и с применением ( $^2$ ) упрочнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закалка, как наиболее эффективное и распространенное средство снижения износа деталей и инструмента, получила новые возможности с разработкой в 80–90-х годах XX века способов ее выполнения плазменной дугой.

Значительным событием в развитие плазменной закалки стала разработка установки УДГЗ-200, которую выполнили в 2002г. в ООО «Композит» (г. Нижний Тагил). Она впервые сделала плазменную закалку доступной ручному применению, чем существенно расширила область ее применения. *Теперь закаливается, что было не доступно.* При этом закалка установкой УДГЗ-200 удобно автоматизируется и роботизируется.

Установка УДГЗ-200 является первой специализированной установкой для плазменной закалки, на которую разработаны Технические условия и которая прошла сертификацию. По настоящее время она не имеет конкурентов, т.е. сообщения о выпуске или поставке установок для ручной поверхностной плазменной закалки на рынке отсутствуют.

Закалка установкой УДГЗ-200 происходит без подачи воды на деталь, за счет теплоотвода в ее тело. Поэтому может применяться не только в термических цехах, но и на ремонтных площадках, по месту обработки и эксплуатации деталей. Работу нейосваивают сварщики 2–3 разрядов. Как следствие, внедрение установки в производство происходит без затруднений.

УДГЗ-200, оставляя на поверхности цвета побежалости, не приводит к существенному ухудшению шероховатости в диапазоне  $R_z$  4...40, не дает деформаций, благодаря чему многие закаленные детали идут в эксплуатацию без финишной шлифовки. Это позволяет сократить процесс изготовления, снизить себестоимость.

Твердый (HRC45...65) слой закалки (0,5–1,5мм) многократно увеличивает срок службы: крановых рельс и колес, зубчатых и шлицевых соединений, канатных блоков, футеровочных плит, вырубных, формовочных, вытяжных штампов и проч.

Установка УДГЗ-200 способна упрочнять низкоуглеродистые стали 20Л, 35Л, обычно не закаливающиеся, в т. ч. посадочные места в корпусах дробилок, прокатных клетей, вагонных тележек и др.

Установка УДГЗ-200 восполняет отсутствие привычного (дорогостоящего и крупногабаритного) термического оборудования, делает процесс упрочнения экологически чистым. Она отмечена серебряной медалью Женевского салона изобретений в 2008г.

Ниже приводятся выдержки из отзывов об установке УДГЗ-200.

Заведующий кафедрой «Сварки и упрочняющих технологий», д-р техн. наук Е.Н. Сафонов в 2007г: «В настоящее время не известно ни импортного, ни отечественного оборудования для ручной плазменной закалки, кроме установки УДГЗ-200, созданной в ООО «Композит».

Главный механик Корпорации «ВСМПО-АВМСМА» Ю. С. Семичев: «На ВСМПО производится термическое и химико-термическое упрочнение запасных частей. Однако конструкторские особенности не позволяют все их подвергать упрочнению. Это приводит к быстрому износу и частым остановкам для ремонтов, что лихорадит производство. Установка УДГЗ-200, внедренная в службе главного механика в 2007г. существенно расширила перечень упрочняемых деталей. Ею производится закалка направляющих, крановых колес, шевронных зубьев, шеек крупногабаритных валов».

Главный технолог Карагандинского литейно-машиностроительного завода: «Отмечаем простоту и надежность установки УДГЗ-200, позволившие быстро обучить персонал и начать работы. Освоена закалка 34 наименований деталей: крановые и зубчатые колеса, дорожки поворотных устройств спецтехники, тормозные барабаны грузоподъемных кранов, шлицевые валы, пуансоны и матрицы штампов».

*Для вопросов и отзывов:*

Электронная почта: [vk@udgz.ru](mailto:vk@udgz.ru)

Тел.: +7 950-656-2575

КОРОТКОВ Владимир Александрович

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вологдин, В. П. Поверхностная индукционная закалка / В. П. Вологдин. – М. : Оборонгиз, 1947. – 291 с.
2. Ясногородский, И. З. Автоматический нагрев в электролите / И. З. Ясногородский. – М. : Оборонгиз, 1947. – 24 с.
3. Леонтьев, П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Т. Исканова, М. Г. Хан. – М. : Metallurgia, 1986. – 142 с.
4. Хренов, К. К. Дуговая поверхностная закалка / К. К. Хренов, Г. В. Васильев // Автогенное дело. – 1950. – № 10. – С. 1–5.
5. Кулагин, И. Д. Дуговая плазменная струя как источник теплоты при обработке металлов / И. Д. Кулагин, А. В. Николаев // Сварочное производство. – 1959. – № 9. – С. 1–4.
6. Дудко, Д. А. О новых возможностях сварки высокотемпературной дугой, сжатой газовым потоком / Д. А. Дудко, С. П. Лапиза // Автоматическая сварка. – 1960. – № 11. – С. 39–48.
7. Костиков, В. В. Плазменные покрытия / В. В. Костиков, Ю. А. Шестерин. – М. : Metallurgia, 1978. – 159 с.
8. Селиванов, М. В. Применение плазмы для упрочнения за рубежом / М. В. Селиванов, Н. С. Шепелев. – М. : ЦНИИ информ. и техн.-эконом. исслед. черной металлургии, 1985. – Вып. 2. – 23 с.
9. Линник, В. А. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 4. – С. 2–4.
10. Кобяков, О. С. Использование микроплазменного нагрева в процессах упрочняющей технологии / О. С. Кобяков, Е. Г. Гринзбург // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 65–67.
11. Лещинский, Л. К. Структура и свойства наплавленного металла углеродистых сталей, упрочненных плазменной струей / Л. К. Лещинский [и др.] // Сварочное производство. – 1985. – № 11. – С. 20–22.

12. Бердников, А. А. Плазменная закалка деталей технологического оборудования / А. А. Бердников, М. А. Филиппов, Р. И. Силин, И. Н. Веселов // Прогрессивные технологии упрочнения с применением источников с высокой концентрацией энергии : тез. докл. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДН-ТП, 1986. – С.69–70.

13. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. – Челябинск : Металла, 1993. – 144 с.

14. Бердников, А. А. Упрочнение чугуновых валков методом плазменной закалки / А. А. Бердников [и др.] // Сталь. – 1995. – № 1. – С. 56–59.

15. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение роликов рольгангов / В. А. Коротков, Л. В. Баскаков, И. А. Толстов, А. А. Бердников // Сварочное производство. – 1991. – № 3. – С. 31–33.

16. Способ восстановления стальных деталей: а. с. 1671706 СССР / В. А. Коротков, А. А. Бердников. – Бюл. № 31, 1991.

17. Коротков, В. А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления / В. А. Коротков, О. В. Трошин, А. А. Бердников // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 2. – С. 106–111.

18. Сафонов, Е. Н. Поверхностное упрочнение железоуглеродистых сплавов дуговой закалкой / Е. Н. Сафонов, В. И. Журавлев // Сварочное производство. – 1997. – № 10. – С. 30–32.

19. Иванов, П. П. Эффективный способ поверхностного упрочнения ж/д колес / П. П. Иванов [и др.] // Сталь. – 2000. – № 1. – С. 63–66.

20. Давыдов, В. Н. Особенности электродуговой поверхностной закалки валковых сталей / В. Н. Давыдов [и др.] // Бюл. «Черная металлургия». – 1990. – № 5. – С. 58–60.

21. Вейнбойм, Д. И. Энергетические характеристики дуги, горящей в аргоне, с различной степенью обжатия / Д. И. Вейнбойм, Ж. В. Ратманова // Сварочное производство. – 1974. – № 5. – С. 1–3.

22. Пат. 2313581 Российская Федерация. Способ ручной плазменной закалки / В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, Э. Ж. Агофонов [и др.]. – Бюл. № 36 от 27.12.2007.

23. Пат. на полезную модель 57282 Российская Федерация. Горелка для ручной поверхностной закалки / В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, Э. Ж. Агофонов [и др.]. – Бюл. № 28 от 10.10.2006.

24. Коротков, В. А. 10 лет применению ручной плазменной закалки / В. А. Коротков // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 2–5.

25. Пат. на полезную модель № 95665 Российская Федерация. Устройство плазменной закалки изделий из стали и чугуна в автоматическом и ручном режиме двухдуговым плазмотроном / Е. Н. Сафонов, В. С. Демин, И. С. Дружинин, Л. В. Чадин. – Бюл. № 19 от 10.07.2010.

26. Белинин, Д. Плазменная закалка плит опорной пары мостовой конструкции [Электронный ресурс] / Д. Белинин // Конкурс научно-технического творчества молодежи. – Ульяновск, 2011. – Режим доступа: <http://ify.ulstu.ru>, свободный.

27. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шекуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

28. Сварка в машиностроении : справ. в 4-х тт. Т. 1 / редкол.: Г. А. Николаев [и др.] ; Т. 1 под ред. Н. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, 1978. – 504 с.

29. Теория сварочных процессов / под ред. В. В. Фролова. – М. : Высш. шк., 1988. – 559 с.

30. Кидин, И. Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали / И. Н. Кидин. – М. : Металлургиздат, 1957. – 94 с.

31. Коротков, В. А. Наноструктурирование стали плазменной дугой / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, В. Я. Шур, Е. И. Шишкин // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 5–7.

32. Ананьев, С. П. Исследование износостойкости материала крановых рельс и колес / С. П. Ананьев, В. А. Коротков // Вестник машиностроения, 2011. – № 8. – С. 35–37.

33. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.

34. *Коротков, В. А.* Износостойкость материалов с плазменной закалкой / В. А. Коротков // Трение и износ. – 2011. – № 3. – С.23–29.

35. *Коротков, В. А.* Плазменная закалка зубчатых и шлицевых соединений / В. А. Коротков // Вестник машиностроения. – 2009. – №8. – С. 87–89.

36. *Андронов, В. А.* О работе Бюро триботехники на Уралвагонзавде / В. А. Андронов, В. А. Коротков// Вестник машиностроения. – 2009. – № 4. – С. 49–52.

37. *Коротков, В. А.* Плазменная закалка чугуновых штампов / В. А. Коротков, А. В. Шекуров, Д. С. Бабайлов, А. С. Зотов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2007. – № 1. – С.31–34.

38. *Коротков, В. А.* Экономика износостойкости/ В. А. Коротков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 6. – С. 8–11.

*Научное издание*

Владимир Александрович КОРОТКОВ

# **ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА**

Редактор *А. В. Конищева*

Корректор *Е. А. Щербина*

---

Подписано в печать 24.12.2012 Формат 60×90/16

Бумага офсетная

Гарнитура «Таймс»

Ризография

Усл. печ. л. 4,00 Уч.-изд. л. 3,59 Тираж 150 экз. Заказ № 1842

---

Редакционно-издательский отдел

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

**Нижнетагильский технологический институт (филиал)**

622031, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59

Отпечатано в РИО НТИ (филиал) УрФУ