

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

КОРОТКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ И
ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ
ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 05.03.06 - "Технология и машины сварочного производства"

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Нижнетагильском институте Уральского государственного технического университета-УПИ.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
с.н.с., Лукин Е.А.

доктор технических наук
профессор Ломоносов Ю.Н.

доктор технических наук
доцент Шалимов М.П.

Будущее предприятие - Нижнетагильский металлургический комбинат (АО НТМК).

Защита состоится "26" 02 1997 г. в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д053.13.08 при Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

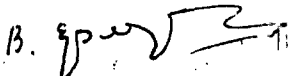
Ваш отзыв в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧТУ.

Телефон для справок 39-94-47

Автореферат диссертации разослан "28" 01 1997г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

 В. Г. ... профессор

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В процессе эксплуатации машин их детали выходят из строя по причине поломок и в результате изнашивания рабочих поверхностей. Меры предупреждения поломок успешно разрабатываются более столетия и расчеты на прочность широко вошли в повседневную инженерную практику. Но этого нельзя сказать о расчетах на износостойкость. Вместе с тем, проектирование и изготовление высокопроизводительных и высокоскоростных машин часто теряет смысл, если их детали не обладают достаточно высокой износостойкостью. Таким образом, разработка новых и совершенствование известных способов упрочнения, получение дополнительных сведений об износостойкости деталей с различным упрочнением и в различных условиях эксплуатации, обобщение имеющегося опыта и разработка рекомендаций по применению тех или иных методов упрочнения и восстановления деталей представляет собой актуальную задачу.

Цель и задачи работы. Целью настоящей диссертации является совершенствование методов восстановления и упрочнения деталей машин и инструмента на базе решения следующих важных научно-практических задач:

- установление влияния термомодеформационных циклов от последующих проходов на образование скрытых внутренних трещин в ранее наплавленных слоях;
- разработка рекомендаций по назначению температуры подогрева в зависимости от жесткости наплавленной детали и термомодеформационной модели процесса наплавки короткими валиками;
- установление закономерностей по снижению деформаций при сварке и наплавке тонких длинномерных валов;
- разработка методик расчета термомодеформаций втулок при наплавке и прочности их посадки на валах;
- исследование свойств стали ХВГ после циклической закалки и выявление возможностей в улучшении ее потребительских свойств;
- выявление возможности улучшения изотермической закалкой соотношения прочностных и пластических свойств в сталях 36Г2С и 40ХН;
- разработка теоретической модели и выявление с ее помощью возможности увеличения глубины плазменной закалки прямой дугой;
- исследование износостойкости стали 3Х2В8 в различном структурном состоянии;
- исследование влияния неоднородности хромистой наплавки на

работоспособность роликов установок непрерывной разливки стали;

- исследование влияния условий эксплуатации на износостойкость поверхностей, упрочненных электроискровым легированием; выявление их износостойкости в условиях трения скольжения;

- разработка концепции выбора методов упрочнения.

Научная новизна. На базе анализа термометформационных явлений выработаны меры по преодолению трудностей, возникающих при наплавке:

- разработаны и подтверждены а.с. способы рационального использования деформаций (усадки), возникающих при наплавке втулок, для компенсации износа их внутренней поверхности и для неподвижного закрепления втулок на валу (по посадке с натягом);

- разработаны методики расчета деформаций наплавленных втулок и прочности их посадки на валах; в них впервые традиционные интегральные уравнения удалось преобразовать в формулы из элементарных функций, что сделало расчеты доступными широкой инженерной аудитории;

установлено, что прочность соединений с натягом, образованных за счет сварочных деформаций, не ниже, чем у аналогичных, собранных традиционной напрессовкой; кроме того 3 ... 7 кратное расширение полей допусков не отражается на прочности соединений;

- разработаны способы, подтвержденные а.с., снижения деформаций изгиба при сварке длинных валов за счет рационального заполнения разделки; разработана методика выделения чисто сварочных деформаций в общей деформации сваренного вала; разработаны рекомендации по подбору режимов "бездеформационной" наплавки тонких валов;

- разработаны рекомендации по снижению температуры подогрева по мере уменьшения жесткости наплавливаемых деталей, а также метод борьбы с появлением внутренних холодных трещин, путем предупреждения наложения зон пластических деформаций (снижения погонной энергии) при многопроходной наплавке;

- теоретически установлена взаимосвязь максимально допустимой длины "короткого" валика с глубиной зоны термического влияния.

Получены новые сведения о свойствах материалов после различных видов упрочнения:

- установлено, что циклическая закалка низколегированных инструментальных сталей типа ХВГ позволяет отказаться от весьма нежелательного, но применяемого для обеспечения максимальной твердос-

ти, традиционного перегрева; при этом увеличивается твердость и вязкость стали, содержание карбидов, а содержание остаточного аустенита снижается;

- установлено, что при изотермической закалке стали 36Г2С и 40ХН на нижний бейнит ударная вязкость выше (в 3,0 и 1,5 раза, соответственно), чем при объемной на ту же твердость;

- теоретически и экспериментально выявлено, что сканирование плазменной дуги позволяет увеличить глубину упрочненного слоя, причем сканирование вдоль, в отличие от сканирования поперек, движения дуги не сопровождается снижением твердости;

- разработан способ, подтвержденный а.с., упрочнения наплавленных деталей плазменной закалкой, предупреждающий появление трещин.

Получены новые сведения об износостойкости упрочненных деталей в различных условиях эксплуатации:

- выявлено, что в условиях горячего трения скольжения сталь 3Х2В8 в "мягком" (отожженном, HRC₉ 18) состоянии обладает неожиданно высокой, такой же как и в твердом (закаленном, HRC₉ 48) состоянии, износостойкостью; установлено, что это связано со структурной стабильностью мягкой стали, ее низким коэффициентом сцепляемости и повышенным (в 3 раза) содержанием карбидных частиц;

- установлено, что структурная неоднородность хромистой наплавки при использовании мартенситных (Св-12Х13) ниже, чем при использовании ферритных (Св-10Х17Т) проволок; это предопределяет меньшие коррозионные повреждения при эксплуатации роликов УНРС, наплавленных мартенситной сталью;

- установлено, что электроискровое легирование (ЭИЛ) стабильно повышает (до 7 раз) износостойкость поверхностей, испытывающих контактные нагрузки (шлицы) и трение качения (ролики); в условиях же трения скольжения прироста износостойкости за счет ЭИЛ добиться возможно, если обеспечить шероховатость упрочненных поверхностей на уровне R_{а0,19} - 0,27.

Разработан вариант концептуального подхода к выбору методов упрочнения, который в значительной мере позволяет компенсировать недостаток сведений об износостойкости упрочненных деталей в различных условиях изнашивания.

Практическая ценность. Результаты исследований внедрены на различных предприятиях Урала с экономическим эффектом более 3 млрд. руб. В АО "Политехник-НТ" на базе результатов работы автором

организовано производство наукоемкой продукции, которая успешно конкурирует с продукцией известных отечественных и западных производителей, таких как Уралмаш, Фест Альпине, Зундвик и др. В 1995 г. ее выпущено на сумму более 4-х млрд. руб. По материалам диссертации разработан и читается с 1990 г. в Нижнетагильском институте Уральского государственного университета-УПИ курс "Методы упрочнения".

На защиту выносятся: - методики: выбора способов упрочнения; выявления чисто сварочных деформаций в общей деформации сварных валов; расчета деформаций втулок при наплавке и прочности их закрепления на валах; снижения температуры подогрева с учетом жесткости наплаваемых деталей; борьбы с холодными трещинами при многослойной наплавке мартенситными жаропрочными сталями.

- способы, подтвержденные а.с.: снижения деформаций изгиба труб при многопроходной сварке; рационального использования сварочных (тепловых) деформаций для компенсации износа втулок и неподвижного их закрепления на валах по посадке с натягом; предупреждения трещин при плазменной закалке наплавленных деталей.

- новые сведения: о свойствах сталей 36Г2С и 40ХН при изотермической закалке; о свойствах стали ХВГ при циклической закалке; об износостойкости стали 3Х2В8 с различной твердостью в условиях горячего трения скольжения; об износостойкости поверхностей, упрочненных ЭИЛ; о свойствах упрочненного слоя при плазменной закалке сканируемой дугой; о свойствах наплавов, выполненных хромистыми сталями, и их износостойкости на роликах УНРС.

Апробация работы. Диссертация доложена на научных семинарах кафедр сварки ЧГТУ и НТИ УГТУ-УПИ, научно-технического Совета отд.30 ЦНИИТМАШ. Материалы диссертации доложены на VII международном конгрессе "Термическая обработка" (г.Москва, 1990 г.), Российской научно-технической конференции "Состояние и перспективы восстановления и упрочнения деталей машин" (г. Москва, 1994 г.), научно-технических конференциях сварщиков Урала (г. Курган, 1982 г.; г. Свердловск, 1986 г.) и др.

Материалы диссертации дважды отмечались премией УНЦ АН СССР; демонстрировались на ВДНХ (бронзовая медаль) и выставке "ВУЗы РСФСР - машиностроению", Тольятти (отмечены дипломом); по ним снят фильм студией Центрнаучфильм.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти разделов, общего заключения, списка литературы из 183 наименований, приложений (акты испытаний и экономической эффективности), всего

$$\sigma_x = \sigma_y = - \frac{\alpha E (T_m - T_0)}{1 - \mu} \quad - \text{ для полубесконечного тела } (2)$$

$$\sigma_x = - \alpha E (T_m - T_0) \quad - \text{ для тонкой пластины } (3)$$

Последняя формула справедлива и при наружном нагреве кольца, когда наружный слой достигает температуры T_m , а температура следующих слоев равномерно убывает и на глубине d становится равной температуре T_0 остальной части кольца. Такой же величины достигают напряжения при нагреве кромки круглого отверстия в тонкой пластине. При глубоком прогреве на всю толщину кольца ($r_2 - r_1 \approx d$) напряжения уменьшаются и составляют 50 % от напряжений в предыдущем случае, см. формулу (3). Такой же результат получается при точечном нагреве тонкой пластины. Таким образом, при наплавке кромок у тонкостенных пластин и наружных поверхностей толстостенных колец температуру подогрева можно снижать по сравнению с температурой подогрева при наплавке на массивное тело, а при выполнении точечных наплавки на тонкой пластине и при наплавке тонкостенных колец допустимо еще большее снижение (см. таблицу I).

Таблица I

Температура подогрева ($^{\circ}\text{C}$) в зависимости от условий наплавки

Стали	Сплошная наплавка на массивное тело (схема нагрева полубесконечного тела)	Наплавка на кромку (в т.ч. внутреннюю в отверстие) тонкой пластины; на толстостенный цилиндр	Наплавка на тонкостенный цилиндр и точечная наплавка на пластину
25Х50МС 3Х2В8	400	314	29
типа "сормайт"	500	457	314

Об оценке длины "короткого" валика. Выше рассматривалось влияние формы и размеров деталей на уровень напряжений при наплавке. Но вместе с тем важно выявить возможности снижения сварочных напряжений за счет изменения технологии наплавки. Если нагревать (наплавлять) не всю поверхность полубесконечного тела, а узкую полосу (случай наплавки одиночного валика), то напряжения удовлетворяют неравенствам:

$$|\sigma_y| < |\sigma_x| < \frac{\alpha E(T_m - T_0)}{1 - \mu} \quad (4)$$

Сравнивая формулы (2) и (4) можно заметить, что при наплавке одиночного валика уровень напряженного состояния ниже, чем при сплошной наплавке. Из последнего логично предположить, что ещё ниже уровень напряженного состояния окажется в коротких наплавленных валиках, что подтверждается практическим опытом. Так сварку чугуна при "холодном" способе рекомендуется производить валиками небольшой протяженности. Но какие наплавленные валики считать короткими?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим неравномерный нагрев (наплавку) края тонкой пластины. Предположим нагрев края пластины по всей его длине. В этом случае справедлива формула (4). Предположим теперь, что произведена наплавка (нагрев) на край пластины валика конечной длины с осью $-y-$, перпендикулярной ее плоскости, началом оси $-x-$, совпадающим с краем наплавленного валика, и осью $-z-$, направленной в тело пластины. Касательные напряжения τ_{xz} , равные нулю из-за граничных условий на поверхности наплавки ($z = 0$) по мере увеличения $-z-$ будут изменяться в пределах зоны термического влияния $-d-$. Но вместе с изменением касательных напряжений, согласно известному условию:

$$\frac{d\tau_{xz}}{dz} = - \frac{d\sigma_x}{dx} \neq 0 \quad (5)$$

будет происходить нарастание нормальных напряжений, но уже по длине валика. Отсюда следует, что на расстоянии $-d-$ от каждого края (начала и конца) наплавленного валика по оси $-x-$ будет происходить нарастание нормальных $-\sigma_x-$ напряжений (рис. 1). Логично предположить, что на участках, где напряжения $-\sigma_x-$ нарастают от нуля до некоторо-

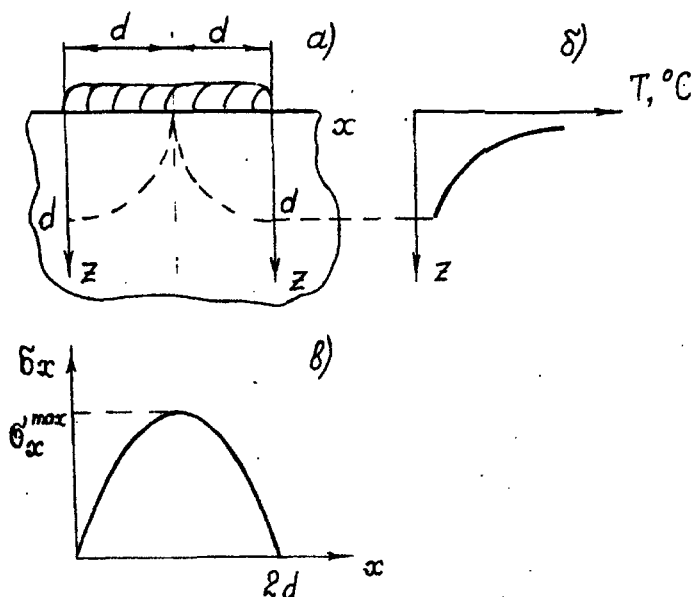


Рис. I Термодформационная модель наплавки короткими валиками: а - схема наплавки, б - распределение температуры, в - распределение нормальных напряжений

го предельного значения (например, до $\sigma_x^{\max} = \sigma_B$) трещины образовываться не будут. Поскольку длина, на которой нарастают σ_x согласно (5) пропорциональна глубине прогрева, то и длина короткого валика, в котором не может быть трещин, тоже пропорциональна глубине прогрева. Отсюда следует, что увеличение погонной энергии на-

плавки, сопровождающееся ростом глубины прогрева, способствует росту длины коротких валиков. Косвенным подтверждением связи критической длины наплавленного валика или нагреваемого участка с глубиной прогрева является то, что глубокие термические трещины, например в прокатных валках, располагаются на большем расстоянии друг от друга, чем мелкие трещины.

Внутренние холодные трещины и меры по их предупреждению. До последнего времени не учитывалось, что наложение термопластических деформаций при износостойкой наплавке может приводить к исчерпанию пластичности и образованию трещин во внутренних слоях. Для определения зон термопластических деформаций при локальном нагреве рассмотрен поверхностный нагрев полубесконечного тела. Температура границы (z_n) между зонами чисто упругого и упругопластического сжатия при окончании поверхностного нагрева находится по формуле:

$$T_n = T(z_n) = T_0 + (1 - \mu) \frac{\sigma_s}{\alpha \cdot E} . \quad (6)$$

Величина пластической деформации, рассчитывается по формулам:

$$\varepsilon^p(z) = \begin{cases} -\alpha [T(z) - T_0] + (1 - \mu) \frac{\sigma_s}{E} , & [z_s < z < z_n] , \\ -\alpha [T(z) - T_0] , & [z < z_s] . \end{cases} \quad (7)$$

В конце стадии охлаждения до начальной температуры $T(z) = T_0$ в зоне, получившей при нагреве пластическое обжатие ($\varepsilon^p(z) < 0$), возникают растягивающие напряжения, в результате чего образуются области упругого и упругопластического растяжения. Температура их границы (z_0) определяется из выражения:

$$T_0 = T(z_0) = T_0 + 2(1 - \mu) \frac{\sigma_s}{\alpha \cdot E} . \quad (8)$$

При сквозном нагреве узкой полосы в листе границы зон упруго-пластических деформаций переходят в области более высоких температур:

$$T_{\Pi} = T(z_{\Pi}) = T_0 + \sigma_S / \alpha \cdot E . \quad (9)$$

$$T_0 = T(z_0) = T_0 + 2\sigma_S / \alpha \cdot E . \quad (10)$$

Найденные зависимости позволяют указать зоны, получившие пластическое сжатие или растяжение в ущерб имеющемуся запасу пластичности материала (рис.2). Для самых верхних участков, нагреваемых выше температуры T_S , деформация обжатия не наносит ущерба их пластическим свойствам, т.к. она не сопровождается образованием напряжений, ибо при высоких температурах материал утрачивает прочностные качества. Наибольший ущерб запасу пластичности наносится в зоне $\{z_0, z_S\}$, которая поочередно испытывает сначала пластическое сжатие при нагреве, а затем пластическое растяжение при охлаждении.

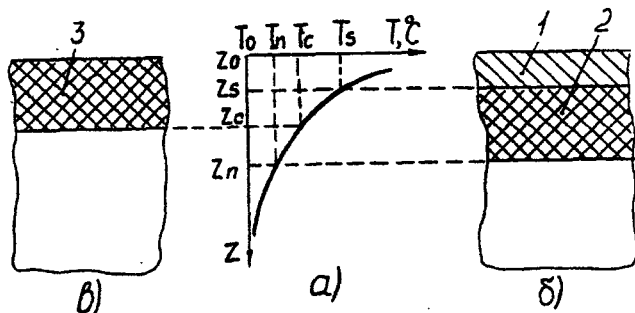


Рис.2 Образование зон пластических деформаций при поверхностном нагреве. а - распределение температуры на момент окончания нагрева, б - зоны пластического (1) и упругопластического (2) обжатия при нагреве, в - зона упругопластического растяжения (3) после охлаждения.

В таблице 2 приведены результаты расчётов по полученным формулам. Сопоставим (табл.3) глубину распространения изотермы T_{Π} с толщиной металла, наплавляемого за один проход, а также запас пластичности сталей с максимальной термопластической деформацией. Первое сопоставление позволит определить, сколько раз (N) в действительности может происходить наложение зон термопластичности при много-

слоистой наплавке. Второе же - даёт допускаемое число наложения термомоциклов ($N_{\text{доп}}$), не вызывающее истощения запаса пластичности и, следовательно, появления трещин. Заметим, что каждый проход наплавки вызывает 2-х кратное пластическое деформирование, поэтому $N_{\text{доп}}$ должно быть вдвое меньше частного ($\delta_5/\varepsilon^{\text{P.max}}$). Для стали 08 $N_{\text{ф}}$ сос-

Таблица 2

Значения температуры границ упруго-пластических областей для полубесконечного тела.

Название границы (рис. I.2)	Температура, °C границ для сталей				
	08	55	15ХМ	4Х5МФС	12Х18Н9
$T_{\text{п}}$	62	103	103	353	51
$T_{\text{с}}$	104	186	186	686	82

Таблица 3

Таблица данных для прогнозирования трещинообразования

Сталь	$\varepsilon^{\text{P.max}}$, %	δ_5^{*1} , %	Толщина одного слоя наплавки, мм	Глубина распространения изотермы $T_{\text{п}}$, *2) мм
08	1,00	30	2...4	15...30/10...21
12Х18Н9	1,62	40		
55	1,12	14	2...4	12...26/8...18
15ХМ	1,05	20		
4Х5МФС	1,20	10	2...4	8...19/6...13

*1) Справочные. *2) Первые числа для дуги мощностью 4 кВт, а вторые - 20 кВт; в числителе для скорости наплавки 20 м/ч, а в знаменателе - 35 м/ч.

тавляет $30 : 2 = 15$ - при неблагоприятном сочетании параметров режима, и $10 : 4 = 2,5$ - при благоприятном. И в первом и во втором случаях опасности появления трещин не возникает ибо N_{ϕ} не превышает $N_{\text{доп}} = (30:1,00):2 = 15,0$. Для стали 4Х5ГМС, сравнивая N_{ϕ} 1,5...9,5 с $N_{\text{доп}} = 8,4$, можно заметить, что оптимальным средством борьбы с внутренними трещинами может быть подбор режима с минимальной погонной энергией, обеспечивающей минимальную кратность наложения зон термопластичности от последующих наплавочных проходов. При этом запас пластичности стали окажется $(8,4:1,5 \approx 4)$ четырёхкратным.

Таким образом, разработан дополнительный способ борьбы с холодными трещинами при многослойной наплавке, заключающийся в уменьшении погонной энергии. Его применение целесообразно, когда известные способы недостаточно эффективны. Например, при многослойной наплавке мартенситными жаропрочными сталями, когда подогрев и увеличение погонной энергии не предупреждает появление закалочных структур и сопутствующих им холодных трещин.

Рациональное использование сварочных деформаций. Поверхностный нагрев или наплавка полых цилиндров обычно сопровождается уменьшением внутреннего диаметра, которое можно использовать для компенсации износа и для закрепления втулок на валах по посадке с натягом. Но несмотря на выполненные в этой области исследования (В.И. Махненко, Г.Д. Грингауз, В.А. Хланов), до последнего времени оставалось не ясно какую наибольшую усадку втулки можно получить за счет термдеформирования, при каких условиях нагрева она реализуется, какое давление может оказать втулка на вал, если она на нем находится во время термдеформирования.

Использована традиционная схема процесса термического деформирования втулок. Решение плоской упругопластической задачи позволило получить уравнение для нахождения границы ($r = b_H$) области упругопластического сжатия от неравномерного поверхностного нагрева:

$$\frac{2a^2}{b_H^2 - a^2} \sigma_T \ln \frac{K_H}{b_H} + \alpha E \left[\frac{2}{b_H^2 - a^2} \int_a^{b_H} T(r) r dr - T(b_H) \right] = \sigma_T, \quad (II)$$

где σ_T , E , α - предел текучести, модуль упругости и коэффициент линейного расширения материала втулок; a , b - внутренний и наружный радиусы втулок; r - текущий радиус втулок; K_H - радиус, где температура принимает критическое значение, при котором $\sigma_T = 0$; $T(r)$ - распределение температуры по радиусу втулки.

Анализ уравнения (II) показал, что область пластического сжатия для втулок из низкоуглеродистой стали ограничивается интервалом изотерм 100 ... 200°C. Установленная связь границы области пластического обжатия с температурой позволяет сократить объем вычислений, ограничив их тепловыми расчетами.

В стадии охлаждения возможно образование нескольких областей упругого и пластического сжатия и растяжения. Аналитическое описание этого процесса требует решения системы интегральных уравнений, см. систему уравнений (12). В результате анализа удалось формулу (13)

$$\left\{ \begin{aligned} & \sigma_T \left[\ln \frac{b_{o1} b_{o3}}{a b_{o3}} - \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right] \frac{2b_{o2}^2}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} - \frac{2\alpha E}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} \int_{b_{o1}}^{b_{o2}} T(r) r dr = -\sigma_T \\ & \sigma_T \left[\ln \frac{b_{o1} b_{o3}}{a b_{o3}} - \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right] \frac{2b_{o1}^2}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} - \frac{2\alpha E}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} \int_{b_{o1}}^{b_{o2}} T(r) r dr + \\ & + \alpha E T(b_{o2}) = \sigma_T \end{aligned} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\sigma_T}{E} \left\{ \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} + \ln \frac{b_{o3}}{b_{o2}} \right) \right]^4 - \left[1 - \frac{1}{2} \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right]^4 \right\} + \\ & + \alpha T(b_{o3}) \left[1 - \frac{1}{2} \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right]^3 - \alpha T(b_{o2}) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\ln \frac{b_{o3}}{b_{o2}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right) \right]^3 - \frac{3}{2} \alpha \int_{b_{o2}}^{b_{o3}} T(r) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\ln \frac{r}{b_{o3}} - \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right) \right]^2 \frac{dr}{r} = 0 \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned} \epsilon_t(a) &= \frac{\sigma_T}{E} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{b_{o1}}{a} \right)^4 \right] + \left\{ \frac{\sigma_T (1+\mu) b_{o2}^2 + (1-\mu) b_{o1}^2}{E (b_{o2}^2 - b_{o1}^2)} \times \right. \\ & \times \ln \frac{b_{o1}}{a} - \frac{\sigma_T}{E} \left[\ln \frac{b_{o3}}{b_{o2}} + \frac{r^2 - b_{o3}^2}{2r^2} \right] \frac{2b_{o2}^2}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} - \frac{2\alpha}{b_{o2}^2 - b_{o1}^2} \int_{b_{o1}}^{b_{o2}} T(r) r dr + \\ & \left. + \frac{\sigma_T}{E} \left[1 + (1-\mu) \ln \frac{b_{o1}}{a} \right] \right\} \left[1 + \frac{1}{2} \ln \frac{b_{o1}}{a} \right]^3 - \frac{\sigma_T}{E} \end{aligned} \quad (13)$$

привести к более простым зависимостям. Установлено, что если зона пластического сжатия при нагреве достигает критического радиуса:

$$\sqrt{af} \geq b_H, \quad (14)$$

где f - наружный радиус втулки с учетом толщины наплавленного металла;

то происходит пластическое обжатие внутренних слоев втулки ($b_{01} = b_{02} = b_H$, $b_{03} = f$) и она получает значительную усадку, соизмеримую с запасом теплового сокращения (ϵ^T):

$$\epsilon^T(a) = -\alpha T(K_H). \quad (15)$$

Последнее для низкоуглеродистой стали составляет $14 \cdot 10^{-6} \times 700 = 9,8 \cdot 10^{-3}$. В противном случае, т.е. при $\sqrt{af} < b_H$ происходит пластическое растяжение наружных слоев втулки, а деформация внутренних слоев (усадка втулки) будет упругой и, следовательно, соизмеримой с запасом упругой деформации (ϵ_y):

$$\epsilon_y(a) = -\frac{\sigma_T}{E}, \quad (16)$$

которая для низкоуглеродистой стали составляет: $240/2 \cdot 10^5 = 1,2 \cdot 10^{-3}$. Это почти на порядок (в 7 раз) меньше, чем в предыдущем случае.

В таблице 4 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений деформаций наплавленных втулок. Уровень точности характерен для такого типа расчетов. При этом подтвердилась справедливость условия (14) образования больших по величине остаточных деформаций, которые в рассматриваемой проблеме их рационального использования вызывают наибольший интерес.

Полученные результаты с изменением знака неравенства на противоположный справедливы также для случая неравномерного нагрева втулок не с наружной, а с внутренней поверхности.

Вышерассмотренный случай термомодеформирования втулок предполагает пластическое обжатие за счет неравномерного нагрева. Но термомодеформирование можно осуществить при равномерном нагреве с последующим односторонним (снаружи или изнутри) интенсивным охлаждением. Остаточная деформация на внутренней поверхности приближенно может быть оценена по формуле:

$$\epsilon(a) = -\alpha \Delta T_{BH}^{нар}, \quad (17)$$

где $\Delta T_{BH}^{нар}$ - наибольшая разность температур, возникающая в ходе ох-

Деформация наплавленных втулок

Размер втулок, мм		Погонная энергия наплавки, МДж/м	Деформация, $\times 10^3$	
внутренний радиус	толщина		расчетная	опытная
19,5	6,5	0,12	упругая 1,2	3,9
19,5	13,0	0,12		2,3
40,0	13,0	0,12		1,4
19,5	6,5	0,76	упруго-пластическая 9,8	13,8
19,5	13,0	0,76		6,1
22,5	10,0	0,27		4,9
26,0	6,5	0,76		11,9
40,0	6,5	0,50		7,0
110,0	10,0	0,50		6,4

ладения между внутренней и наружной поверхностями втулки. Значение $\Delta T_{\text{вн}}^{\text{нар}}$ пропорционально разности между скоростью отвода тепла от поверхности втулки и скоростью перемещения тепла в теле втулки. Анализ этой зависимости позволил заключить, что способ термомодеформирования втулок за счет неравномерного охлаждения наиболее эффективен для толстостенных (≈ 40 мм) втулок. Способ же термомодеформирования втулок за счет неравномерного нагрева более универсален и позволяет получать значительную термоусадку не только у толстостенных, но и у тонкостенных втулок (5...10 мм).

Принятая расчетная схема позволяет определить величину контактного давления в соединениях с натягом, образованных за счет термических остаточных деформаций. При этом соединение рассматривается как одна втулка, у которой внутренний радиус равен внутреннему радиусу действительного вала, а наружный — наружному радиусу действительной втулки. Контактное давление определяется, как радиальное напряжение на радиусе, равном внутреннему радиусу действительной втулки. Установлено, что максимального значения контактное давление достигает при условии:

$$b_H \leq a \quad (18)$$

и вычисляется по формуле:

$$p^{\text{max}} = \sigma_T \ln \frac{f}{a} \quad (19)$$

Условие (18) требует некоторого комментария. Оно реализуется только в условиях непрерывно-последовательного нагрева втулок, при котором всегда имеются холодные участки сопряженные с нагретыми.

Сравнивая максимальное контактное давление в соединениях с натягом, образованных за счет тепловых деформаций (формула 19) с максимальным давлением в обычных соединениях с натягом:

$$p_0^{\max} = \sigma_T \frac{f^2 - a^2}{2f^2}, \quad (20)$$

можно отметить, что последнее для аналогичных соединений всегда несколько меньше. Таким образом, соединения с натягом, образованные за счет тепловых деформаций по меньшей мере не менее прочны, чем обычные соединения с натягом.

Экспериментальная проверка подтвердила справедливость полученных формул. Одновременно было установлено, что величина максимального контактного давления не зависит от предварительного оборочного зазора между валом и втулкой, если он в сумме с расчетным натягом не превышает величину усадки втулки в свободном состоянии без вала (см. табл.5). Это позволяет существенно (в 3...7 раз) расширить допуски на посадочные размеры вала и втулки по сравнению с рекомендуемыми и тем самым снизить трудоемкость их механической обработки. На способы рационального использования сварочных деформаций для компенсации износа втулок и неподвижного закрепления их на валах получено 3 а.с.

Таблица 5

Размеры втулок, мм		Усадка втулки при на- плавке, мм	Обороч- ный зазор, мм	Контактное давление, МПа		Погонная энергия наплавки, МДж/м
внут- ренний радиус	толщина после наплавки			расчетное	фактиче- ское	
26	8,5	0,46	0,05	67,9	62,5	0,27
"	"	"	0,20	"	"	
23	11,5	0,24	0,50	97,3	85,4	0,31
"	"	"	0,15	"	"	
20	16,0	0,17	0,03	141,1	133,1	0,50
"	"	"	0,08	"	"	

Снижение деформаций при сварке и наплавке валов. При наплавке и сварке тонких и длинных валов происходит значительное искривление продольной оси, что делает их непригодными к эксплуатации. Поэтому

разработка мер по снижению сварочных деформаций играет важную роль в успешном освоении наплавки и сварки таких деталей.

Часто оказывается, что состыкованные валы перед сваркой имеют предварительное искривление, поэтому важно уметь выделить сварочные деформации в общей деформации сваренного вала. Для этого разработано накладное приспособление (рис.3) с двумя индикаторными головками. При вращении приспособления вокруг сварного соединения по разности максимального и минимального значений индикаторных головок определяется радиальное биение в плоскости сварочного шва и на базовом расстоянии, например, равном 200 мм. Отклонение от соосности в исследуемых сечениях (e_1 и e_2 , соответственно) составляет половину радиального биения. Величина последнего замеряется дважды: после закрепления стыка под сварку и после сварки. На поверхности изделия фиксируют точки, в которых показания индикаторных головок имеют максимальные значения и замеряется центральный угол, образованный радиусами, проходящими через эти точки. Отклонение от соосности, вызванное сварочными деформациями находится по теореме косинусов.

При сварке валов с минимальными деформациями важно равномерно заполнять разделку. Для этого рекомендуется стык разбивать на число центральных углов равных числу проходов, а сварку каждого прохода начинать со смещением относительно предыдущего. При этом величину перекрытия и смещения берут равной длине дуги соответствующего центрального угла. На способы равномерного заполнения разделки при сварке труб получены 2 а.с.

Исследования деформаций изгиба при наплавке труб \varnothing 50 мм с толщиной стенки 5 мм из стали 36Г2С показали, что на их величину оказывает заметное влияние суммарная величина (Z_c) толщины наплавленного металла и глубины распространения зоны термического влияния. Так при сокращении последней с 3,5 мм до 2,2 мм прогиб образцов уменьшается почти на порядок - с 0,70 мм до 0,08 мм. Вместе с

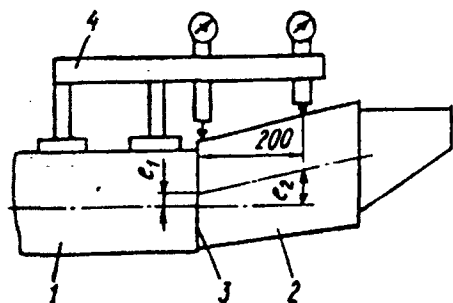


Рис.3 Измерение отклонений от соосности при сварке труб. 1,2 - свариваемые элементы, 3 - сварной шов, 4 - накладное измерительное приспособление.

тем важно воду для охлаждения наплавляемых образцов подавать на наплавляемый валик. В противном случае даже при сохранении $\%C$ на прежнем уровне возможно значительное (до 4 раз) увеличение прогиба образцов. Полученные результаты использованы при разработке технологий наплавки гидроджунзеров малого диаметра и освоении их на Урале в массовом производстве в АО "Политехник-ИГ".

В третьем разделе помещены исследования технологий объемной и плазменной закалок.

Циклическая закалка стали ХВГ. Одной из проблем при закалке низколегированных углеродистых инструментальных сталей является обеспечение высокой и стабильной твердости у крупных изделий. Для этого назначают повышенные температуры нагрева под закалку. Так сталь ХВГ в справочной литературе рекомендуется перегревать, если заготовки достигли всего \varnothing 50 мм. Но перегрев снижает вязкость, увеличивает содержание остаточного аустенита и пр. и, поэтому, нежелателен. Решение проблемы найдено в применении циклической закалки. Исследования проводили на стандартных образцах из стали ХВГ стандартного химического состава. Достижимый при циклической закалке прирост твердости не сопровождается снижением вязкости стали, что связано с отсутствием роста аустенитного зерна (таблица 6). Кроме того, в циклически закаленных образцах наблюдается снижение содержания остаточного аустенита и увеличение карбидной фазы, что, как известно, благоприятно влияет на режущую способность и износостойкость инструмента.

Таблица 6

Свойства стали ХВГ

Вид закалки	HRC ₃	a_n , МДж/м ²	Размер аустенитного зерна, мкм	Объемная доля, %	
				карбидов	остаточного аустенита
Одноразовая (стандартная)	63	0,04	35	4,0	8,7
Циклическая	66	0,05	32	7,3	2,8

Для производственных испытаний в ГПО "Уралвагонзавод" выполняли циклическую закалку протяжек из стали ХВГ. Протяжками обрабатывали изделия из термообработанной конструкционной стали с твердостью НРС₂ 20...34. При нарезании зубьев (модуль 5,5) на поверхности $\varnothing 119$ мм износостойкость циклически закаленных протяжек поднялась в 6 раз (с 25 заготовок, обрабатываемых до переточки, до 120).

Циклическая закалка решила проблему рихтовки после закалки тонких ($\varnothing 20-40$ мм) длинномерных ($l = 1800$ мм) прокатных валков, благодаря чему АО "Политехник-НТ" выиграл конкурентную борьбу у германских фирм "Зундвик" и "Дук" за поставку таких валков на Лысьвенский и Карагандинский металлургические комбинаты.

Изотермическая закалка сталей 36Г2С и 40ХН. Приведенные марки сталей используются при изготовлении бурильных труб и их соединительных элементов. Для повышения износостойкости их подвергают закалке. Но при этом ухудшается вязкость стали и возрастает вероятность поломок при эксплуатации. В связи с этим на стандартных образцах исследовались свойства перечисленных сталей после изотермической закалки. Было установлено, что при изотермической закалке на нижний бойнит (НРС₂ 40) ударная вязкость в 1,5...3,0 раза выше чем при объемной закалке на ту же твердость. Это преимущество сохраняется при испытаниях образцов с повышенной остротой надреза и при пониженных температурах.

Плазменная закалка сканируемой дугой. При плазменной закалке дугой прямого действия трудно без оплавления поверхности получить упрочненный слой толщиной более 1 мм. Если учесть, что финишное шлифование уносит 0,2-0,5 мм упрочненной поверхности, то становится очевидной актуальность повышения глубины плазменной закалки.

Сканирование дуги позволяет снизить интенсивность подвода энергии, тем самым предупредить оплавление и добиться увеличения глубины закалки. Чтобы определить режим оптимального сканирования разработана математическая модель, которая предусматривает что закалке подвергается слой ограниченный изотермой 850 °С, а температура поверхности во избежание оплавления не превышает 1500 °С. При расчетах использована формула распределения температуры в полубесконечном теле при нагреве его движущимся источником малой протяженности. В случае источника большой протяженности последний разбивался на множество элементарных источников с суммарной мощностью равной исходной. Определялась глубина (h) проникновения изотермы 850 °С,

время ($t_{\text{ауст}}$) нахождения при температуре выше 350°C и время ($t_{\text{охл}}$) охлаждения от 350°C до 450°C . Анализ результатов показывает, что увеличение толщины (h) закаленного слоя (глубины проникновения изотермы 350°C) происходит как при увеличении размеров источника, так и при уменьшении его скорости перемещения. Одновременно с увеличением h происходит увеличение ($t_{\text{ауст}}$) и ($t_{\text{охл}}$). Первое способствует нарастанию твердости, благодаря более полному растворению легирующих элементов в аустените, а второе - ее снижению. При неблагоприятном стечении обстоятельств рост толщины закаленного слоя может сопровождаться снижением его твердости. Анализ показал, предупредить последнее можно, если сканировать дугу не перпендикулярно, а вдоль направления движения. При этом глубина закалки увеличивается на 10...60 %, ($t_{\text{ауст}}$) - в 3...4 раза, а время ($t_{\text{охл}}$) уменьшается на 40...60 % (рис.4).

Плазменная закалка наплавленных деталей. Наплавка износостойкими материалами затрудняет механическую обработку. Поэтому бывает целесообразно произвести наплавку легкообрабатываемым материалом, а после мех.обработки упрочнить поверхность плазменной закалкой. При этом увеличивается вероятность образования закалочных трещин. Исследованиями установлено, что трещины образуются там, где толщина наплавки превышает глубину закаленного слоя менее чем на 0,5 мм. На этом же участке происходит переход остаточных сжимающих напряжений

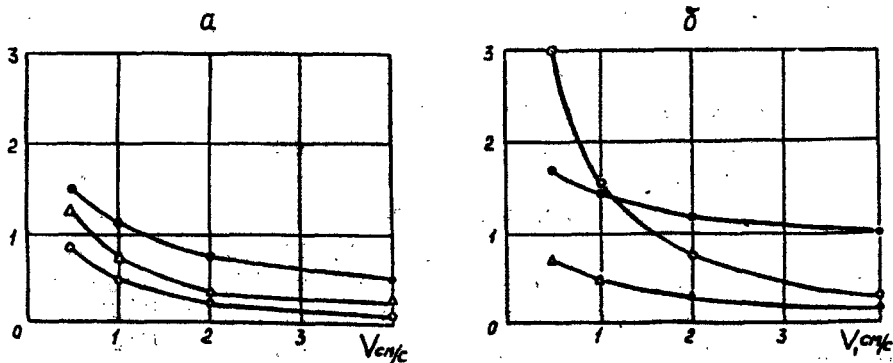


Рис.4 Зависимость h (•, мм), $t_{\text{ауст}}$ (○, с) и $t_{\text{охл}}$ (△, с) при сканировании дуги: а - перпендикулярно движению, б - в направлении движения.

в растягивающие. Если зона изменения микротвердости и остаточных напряжений захватывает границу наплавленного слоя, характеризующуюся низкими пластическими свойствами, то в результате сложения 3-х неблагоприятных факторов образуются трещины.

В четвертом разделе выполнены исследования износостойкости упрочненных поверхностей в различных условиях эксплуатации.

Износостойкость стали 3Х2В8 в различных структурных состояниях. Традиционно сталь 3Х2В8 закалывают на твердость $HRC_{\text{э}}$ 48. Но при эксплуатации инструмента в результате контакта с разогретой заготовкой твердость поверхности снижается. Поэтому сталь исследовалась в твердом ($HRC_{\text{э}}$ 48) и мягком ($HRC_{\text{э}}$ 28 и $HRC_{\text{э}}$ 18) состояниях. Исследования проводились на адгезиометре Л.Ш. Шустера; результаты представлены на рис. 5. Из него видно, что сталь 3Х2В8 как будучи индентером, так и контртелом при понижении твердости с $HRC_{\text{э}}$ 48 до $HRC_{\text{э}}$ 28 заметно увеличивает коэффициент сцепляемости " K_C ", т.е. снижает износостойкость. Это подтверждено производственными испытаниями раскатных оправок (см. таблицу 7). Но вместе с тем дальнейшее снижение твердости исследуемой стали до $HRC_{\text{э}}$ 18 не только привело к дополнительному росту " K_C ", но уменьшило его значение до уровня твердой стали. Это довольно неожиданно. Для объяснения природы высокой износостойкости стали 3Х2В8 в мягком состоянии проведен микроструктурный анализ с помощью растрового электронного микроскопа. Компьютерными исследованиями (табл.8) установлено, что в стали в твердом состоянии карбиды занимают не более 6,2 % площади поверхности, тогда как в стали в мягком состоянии - 19 %. Сталь с промежуточной твердостью ($HRC_{\text{э}}$ 28) содержит чуть больше карбидов, чем сталь с высокой твердостью ($HRC_{\text{э}}$ 48). Таким образом, природа низкой адгезионной способности стали 3Х2В8 в мягком ($HRC_{\text{э}}$ 18) связана с интенсивным армированием ее карбидной фазой. Этому также может способствовать еще одно обстоятельство. Уровень ее твердости как раз таков, который приобретает поверхностный слой закаленной оправки в результате нагрева и изнашивания при эксплуатации. Это значит, что структурные превращения в мягкой стали (HRC 18) полностью завершены и она имеет минимальный уровень свободной энергии. Следовательно, если при эксплуатации твердой ($HRC_{\text{э}} > 18$) стали высвобождающаяся в ходе структурных превращений свободная энергия может расходоваться на образование адгезионных связей, то при эксплуатации мягкой стали ($HRC_{\text{э}}$ 18) этот стимулятор адгезии отсутствует. Вероятно, эта структурная стабильность

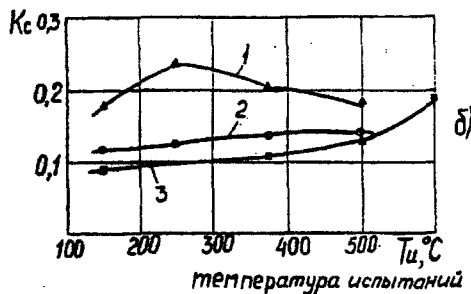
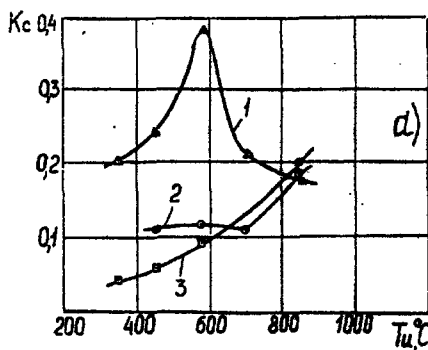


Рис.5 Адгезионная способность стали 3Х2В8 с твердостью, HRC_3 : 1 - 48, 2 - 28, 3 - 18. Сталь служила: а - индентором, б - контртелом.

Таблица 7

Износостойкость оправок из стали 3Х2В8

Твёрдость оправок, HRC_3	Среднее количество труб, раскатываемых на одной оправке, шт	Относительная стойкость, шт/мм
48	221	35,6
28	150	29,6
18	206	36,5

Таблица 8

Характеристика карбидной фазы в стали 3Х2В8

Статистический параметр	Твёрдость стали, HRC_3	
	18	48
Площадь окна	365	231
Число частиц	684	124
Объёмная доля	0,190	0,062

определяет монотонный характер изменения K_C у мягкой стали. Для стали в структурно-нестабильных состояниях (HRC₃ 28; HRC₃ 48) критическое изменение K_C имеет ломанный характер.

Исследование износостойкости наплавленных роликов УНРС. Ролики установок непрерывной разливки стали (УНРС) помимо механических нагрузок испытывают значительное термическое воздействие. Последнее приводит к появлению на их поверхности трещин разгара. Для предупреждения изнашивания и образования трещин ролики УНРС наплавляют хромистыми сталями. В Японии предпочтение отдают ферритным сталям типа GX17, а в России (ЧерМК) и Европе - мартенситным. Чтобы в каждом конкретном случае правильно сделать выбор, исследовались свойства мартенситной и ферритной наплавки. Последняя производилась под флюсом проволоками Св-12Х13 и Св-10Х17Т в два слоя. Установлено, что после базовой компани в обоих случаях поверхность роликов сохранилась без повреждений и на ней не виден рельеф (риски), оставленный резцом (рис. 6). Но на роликах, наплавленных проволокой Св-10Х17Т, он в значительной мере изношен, что объясняется меньшей твердостью (НВ 270) ферритной наплавки по сравнению с мартенситной Св-12Х13 (НВ 400). Кроме того, при эксплуатации роликов в условиях наружного спрейерного охлаждения в ферритной наплавке появляются коррозионные повреждения, чередующиеся с шагом наплавки. Микроисследования показали, что их иницирующим фактором является понижение твердости (НВ 230) высокоферритных участков в средней части наплавленных валков, где локализуются термопластические деформации, появляющиеся при эксплуатации. Источником неравномерности свойств ферритной наплавки является перемешивание с основным металлом. Если в первом слое тип структуры мартенситный с твердостью HRC₃ 37, то в третьем - преобладает феррит HRC₃ 17. Структурная неоднородность между слоями определяет и упомянутую неоднородность в пределах одного слоя, которая проявляется уже при обточке в виде чередующихся темных и светлых полос. При наплавке Св-12Х13 неоднородность наплавленного слоя ни при обточке, ни при эксплуатации не проявляется. Таким образом, наплавка проволокой Св-12Х13 с позиций износо- и трещиностойкости предпочтительнее ферритной наплавки Св-10Х17Т.

Исследование износостойкости поверхностей упрочненных ЭИЛ. Электроискровое легирование (ЭИЛ) имеет историю в несколько десятилетий, но вместе с тем широкого распространения не получило. Это объясняется не только невысокой производительностью процесса, но и

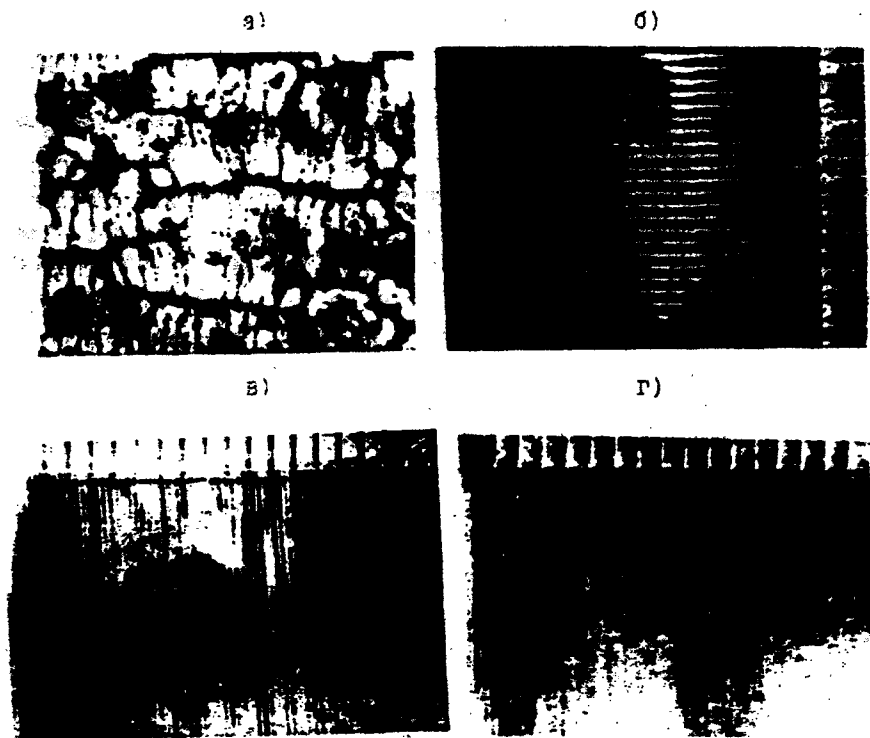


Рис.6 Поверхность после базовой эксплуатации роликов УНРС
из: а - стали 25Х1М1Ф; с наплавкой: б - Св-12Х13, в - Св-10Х17Т,
г - Св-10Х17Т при эксплуатации с наружным спрейерным охлаждением.

нестабильность получаемых результатов. Установлено, что повышают износостойкость при электронском легировании детали, работающие в условиях контактных нагрузок и трения качения. Так, соединительные шлицы на валах из стали 45 за год эксплуатации в прокатном цехе НТМК изнашиваются на 70...80 %. После нанесения на их поверхность методом ЭИЛ твердого сплава ВК-6 износ шлицов за тот же период составил всего 5...7 %. На рис.7 показаны шпоночные пазы приводного вала механического прессы, отработавшие одинаковый срок. Неупрочненный паз быстро получил значительный износ, а упрочненный ЭИЛ - отлично сохранился. Упрочнение ЭИЛ поверхностей, работающих в условиях трения скольжения не столь эффективно.



а)



б)

Рис. 7 Шплицный паз вала механического пресса после долгого срока эксплуатации: а - неупрочненный; б - с карбидным покрытием, нанесенным методом ЭМЛ.

С целью исследования трибологических свойств электроискровых карбидных покрытий проводились испытания по схеме: упрочненный вращающийся ролик - колесика из стандартного вкладыша для автомобильного коленчатого вала. Испытания проводились по стандартной (ГОСТ 23.224-86) методике. В исследуемых парах трения после стадии приработки происходило увеличение шероховатости рабочих поверхностей, т.е. они не прирабатывались. Лишь пары с низким уровнем шероховатости $R_a 0,19 \dots 0,27$ оказались прирабатывающимися, т.е. износостойкими.

Концептуальный подход к выбору методов упрочнения. В настоящее время разработано значительное количество сталей и сплавов, а также методов упрочнения для защиты поверхностей от изнашивания. Но какое решение является оптимальным в том или ином случае? Точный ответ получить на этот вопрос затруднительно, ибо требуется обширная информация об износостойкости в различных условиях материалов с различным уровнем упрочнения. Отсутствие сведений такого характера вынуждает проводить производственные испытания. Но перечень опробуемых вариантов ограничивается высокой стоимостью производственных опытов и успех, по сути дела, зависит от того насколько удачно выбраны варианты. Новый выход из этого круга, т.е. формирование концептуального подхода к выбору методов упрочнения, важен не

только для развития теории, но и в практическом отношении. Так АО "Политехник-НТ", созданное при Уральском государственном техническом университете - УПИ, и взявшие на себя не только разработку технологий, но и выпуск упрочненной продукции, испытывая конкуренцию со стороны отечественными и западных производителей, остро ощутили необходимость с первой попытки удачно выбрать оптимальные методы упрочнения. Излагаемая ниже концепция позволила АО "Политехник-НТ" в конкуренции с такими известными предприятиями как "Уралмаш", "Зундвик", "ФАИ" и др. получить заказы на поставку упрочненных изделий для различных предприятий Урала.

Отметим, что покрытие затрат на упрочнение зависит от их соотношения с приростом износостойкости. Очевидно, что себестоимость 1 кг упрочненной детали не должна возрасти по отношению к неупрочненной. Для анализа воспользуемся формулой:

$$C_y = (TM + OM/n + ЗП + ЦР)/K_{из} \leq C_H \quad (21)$$

где TM - технологические материалы, используемые для упрочнения и др. материальные расходы по осуществлению технологий;

OM - стоимость основного металла, приходящегося на 1 кг технологического;

n - число повторных упрочнений (часто имеет место при наплавке);

$ЗП$ - основная заработная плата; $ЦР$ - цеховые расходы; C_y , C_H - себестоимость 1 кг упрочненной и новой детали, соответственно.

Анализируя приведенную зависимость, отметим, что для каждого конкретного случая упрочнения существует некоторое минимальное значение коэффициента износостойкости ($K_{из}^{min}$), при котором C_y не возрастает. На $K_{из}^{min}$ влияет структура затрат на упрочнение (см. табл.9). В условиях производства с малой материалоемкостью (OM/n) и низким уровнем непроизводительных затрат ($ЦР$), когда стоимость материалов для упрочнения (TM) составляет значительную часть себестоимости, $K_{из}^{min}$ невелик. Это значит, что дешевые технологии упрочнения могут успешно конкурировать с более дорогостоящими, несмотря на то, что последние, как правило, обеспечивают большой прирост износостойкости. Этим объясняется, что многие предприятия продолжают использовать хотя и быстроизнашиваемые, но и вместе с тем недорогостоящие материалы. Например, в колесопркатном

Таблица 9

Сведения о минимальном коэффициенте износостойкости, обеспечивающем экономию, при различной структуре затрат на производство работ

№, ** П/П	ТМ		$\frac{OM}{n}$, руб.	ЗП, руб.	ЦР		$K_{из}^{min}$
	руб.	наименование			руб.	% к ЗП	
1	0,4	Нп-ЗОХГСА	0,04	0,5	0,5	100	1*
	2,8	ПП-ЗХ2В8	---	---	---	---	2,7
	10	ПГ-СР4	---	---	---	---	7,7
2	0,4	Нп-ЗОХГСА	69	2,5	12,5	500	1*
	2,8	ПП-ЗХ2В8	---	---	---	---	1,03
	10	ПГ-СР4	---	---	---	---	1,11

* - База сравнения

** - Первый вариант для автоматической, многоразовой наплавки большого объема металла. Второй вариант для ручной одноразовой наплавки небольшого объема металла.

производстве НТМК более половины прессового инструмента изготавливается не из легированных штамповых сталей, а из простых углеродистых, типа 20; 30; 40. В других же случаях, когда стоимость ТМ составляет лишь незначительную часть в общей себестоимости упрочнения, $K_{из}^{min}$ возрастает и предпочтение следует отдавать дорогостоящим технологиям, обеспечивающим значительный прирост износостойкости.

Очевидно, что стремление получить наибольший $K_{из}^{факт}$ оправдано во всех случаях. В связи с этим внимание привлекают случаи феноменального скачкообразного роста $K_{из}^{факт}$ в результате упрочнения. Анализ показывает, что они, как правило, связаны с изменением механизма изнашивания с более производительного на менее производительный. Проведем небольшой обзор обстоятельств, при которых происходит такая смена. При сдвигании закаленных рельсов (НВ 360) по роликам рольгангов они на конус "сострагивают" незакаленные ролики (НВ 170) и почти не повраждают (коэффициент износостойкости $K_{из}^{факт}$ 4-5) ролики по твердости (НВ 400) незначительно превосходящие рельсы. В других условиях ожидать столь заметного прироста износостойкости при имеющемся небольшом уровне упрочнении не приходится. Но в данном случае высокопроизводительное изнашивание

снятием мини- и микростружки сменилось на менее производительное изнашивание по механизму контактной усталости.

Часто детали и инструмент подвергаются многофакторному воздействию: истиранию, деформированию, выкрашиванию и т.д. В этих случаях важно выявить наиболее агрессивный разрушающий фактор, который определяет срок службы. Пуансоны $\approx 3...4$ мм, пробивающие отверстия в оцинкованном листе, выходили из строя (происходила поломка) чрезвычайно быстро. Различные меры, связанные с заменой стали и режимов термообработки, оказывались неэффективными, пока не было установлено, что поломке предшествует налипание на пуансон цинка. Для устранения этого явления на пуансон нанесли оксидное тонкопленочное плазменное покрытие. Налипание цинка и поломки прекратились, а стойкость пуансонов возрасла в 22 раза. Их выход из строя стал связан с затуплением режущей кромки. Но не редко упрочнение приводит к смене главного разрушающего фактора. Кромка отверстия в подпуансонной плите из стали 35, которая используется для прошивки отверстий в разогретых заготовках для железнодорожных колес, быстро деформируется с образованием напыла. Кромка, наплавленная сталью 25Х5МС с твердостью НВ 450, при эксплуатации стала растрескиваться. Срок службы плиты при этом не увеличился. И только отпуск наплавленной плиты, на твердость НВ 200, позволил предупредить как деформацию, так и трещинообразование, что привело к повышению износостойкости более чем в 3 раза. Таким образом, при упрочнении важно не только выработать меры по изменению механизма изнашивания, но и предусмотреть, чтобы не произошло более быстрого выхода из строя упрочненного изделия, но уже по другой причине.

В пятом разделе изложены результаты внедрения научных разработок в производстве.

Способ крепления втулок на валах за счет сварочных деформаций применен для крепления стабилизирующих колец на бурильных трубах. Это стало возможным благодаря тому, что при новом способе сборки не требуется высокой точности обработки сопрягаемых поверхностей и он может быть осуществлен на обычном серийном оборудовании, а не на уникальном. Исследования по бездеформационной сварке труб позволили освоить приварку резьбовых концов к бурильным трубам и за счет этого создать "гладкоствольную" бурильную колонну повышенной технологичности. Использование бурильных труб со стабилизирующими кольцами и приваренными резьбовыми концами в Северо-Уральской геологоразведочной экспедиции показало их высокую эффективность.

Закономерности деформирования при наплавке тонких валов были учтены, что позволило впервые в стране в промышленных масштабах освоить наплавку тонких гидроплунжеров нержавеющей стали.

Выявленные закономерности образования неоднородностей при наплавке нержавеющей стали позволили оптимизировать наплавку роликов установок непрерывной разливки стали и многотонных (до 120 тн) валов конусных дробилок. В первом случае была выиграна конкуренция у австрийской фирмы Фест-Альпине и получен заказ на поставку наплавленных роликов на Нижнетагильский металлургический комбинат, а во-втором - впервые в стране удалась успешная наплавка таких изделий.

Выявленные термомеханические причины образования внутренних трещин, позволили оптимизировать режимы и успешно осуществить многопроходную наплавку жаропрочными сталями прокатных валков на металлургических Серовском заводе и Нижнетагильском комбинате.

Исследования термомеханических процессов при наплавке "короткими" валиками позволили оптимизировать режимы и впервые в стране освоить толстослойную (до 50 мм) наплавку приводных "трефов" чугунных прокатных валков.

Новые сведения об износостойкости поверхностей, упрочненных ЭИЛ, позволили выявить оптимальные области их применения в условиях металлургического производства.

Термоциклическая обработка инструментальных сталей применена при изготовлении тонких валков станов холодной прокатки, благодаря чему выиграна конкурентная борьба у западных фирм Зундвик и Дюк и получены заказы на поставку валков на металлургические Лысьвенский завод, Карагандинский комбинат, Верхнесалдинское объединение.

Автору так же удалось по разработкам диссертации организовать при Уральском гостехуниверситете в рамках АО "Политехник-НТ" выпуск упрочненной продукции, объем которой в 1995 г. составил 4,5 млрд. руб.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями по совершенствованию методов восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей и инструмента достигнуты следующие технологические и технико-экономические результаты.

1. Получили развитие вопросы теории сварочных процессов в области термомеханических явлений.

Показано, что наложение зон термопластических деформаций при

многослойной наплавке может приводить к исчерпанию запаса пластичности и образованию трещин во внутренних слоях. Разработана методика приближенного определения границ областей термопластических деформаций. Предложено для предупреждения внутренних холодных трещин при многослойной наплавке мартенситными жаропрочными сталями снижать погонную энергию наплавки.

Предложено уменьшать температуру подогрева менее жестких деталей по сравнению с массивным телом соответственно снижению уровня термических напряжений. Приведены формулы расчета термических напряжений для различных случаев неравномерного нагрева.

Разработана модель образования напряжений в коротких валиках, учитывающая интенсивность тепловложения сварочной дуги. Показано, что при прочих равных условиях длина короткого валика тем больше, чем больше его толщина и глубина прогрева основного металла, то есть чем больше погонная энергия.

Разработана теоретическая модель и показано, что сканирование дуги при плазменной закалке позволяет без оплавления поверхности добиться увеличения глубины (толщины) упрочненного слоя. Установлено, что сканирование дуги вдоль движения имеет преимущественно перед сканированием поперек движения в том, что увеличение глубины упрочненного слоя происходит без снижения его твердости.

2. Разработаны способы, совершенствующие технологию наплавки.

Разработаны способы (а.с. 772788, 1017462, 1544544) рационального использования сварочных (термических) деформаций для восстановления размеров втулок и неподвижного закрепления их на валах по посадке с натягом. Для их практического применения предложены расчетные методики, выгодно отличающиеся от известных тем, что традиционные для таких задач системы интегральных уравнений, обычно решаемых численно на ЭВМ, без существенного ущерба точности приведены к формулам, записанным в классе элементарных функций. Это сделало методики доступными широкой инженерной аудитории.

Разработаны способы (а.с. 1303314, 1303315) снижения изгиба при сварке труб, а также методика выявления чисто сварочных деформаций в общей деформации сварной трубы; выявлена возможность "бездеформационной" наплавки тонких длинномерных валов слоями различной толщины и разработаны рекомендации по подбору режимов.

Установлена возможность снижения неоднородности наплавленного слоя за счет рационального выбора нержавеющей наплавочных проволок.

Разработан способ (а.с. 1671706) упрочнения наплавленных деталей плазменной закалкой, предупреждающий появление закалочных трещин.

3. Получены новые сведения о свойствах материалов после различных видов упрочнения.

Установлено, что циклическая закалка стали ХВГ обеспечивает без перегрева и ухудшения вязкости повышенную твердость даже на массивных заготовках. По сравнению с обычной при циклической закалке содержание остаточного аустенита ниже (2,8 % вместо 8,7 %), а объемная доля карбидов выше (7,3 % вместо 4,0 %).

При изотермической закалке стали 36Г2С и 40ХН на нижний бейнит ($HRC_{\text{э}}$ 40) ударная вязкость выше (в 3,0 и 1,5 раза соответственно) чем при объемной закалке на ту же твердость. Это преимущество сохраняется при испытаниях образцов с повышенной остротой надреза и при пониженных температурах.

Плазменная закалка по сравнению с печной обеспечивает повышенную твердость. Однако, снижение погонной энергии дуги для увеличения глубины закалки часто устраняет это преимущество. Избежать этого можно за счет сканирования дуги, но не поперек, а вдоль движения дуги.

4. Получены новые данные об износостойкости упрочненных поверхностей в различных условиях эксплуатации.

Выявлена в условиях горячего трения скольжения аномально высокая износостойкость стали 3Х2В8 в мягком ($HRC_{\text{э}}$ 18) отожженном состоянии - на уровне износостойкости в твердом ($HRC_{\text{э}}$ 48) закаленном состоянии. Установлено, что в отожженном состоянии эта сталь в отличие от закаленного отличается структурной стабильностью и содержит в 3 раза больше карбидной фазы. Коэффициент сцепляемости отожженной стали ниже чем у закаленной и имеет монотонный характер изменения с ростом температуры испытаний.

Наплавка роликов установок непрерывной разливки стали хромистой сталью существенно (в 3 раза) повышает их срок службы. Установлено, что оптимальной является наплавка слоя до 4-х мм сталью мартенситного класса, которая в отличие от ферритной наплавки более износо- и трещиностойкая; последнее связано с ее более высокой структурной однородностью.

Электроискровое легирование поверхностей спеченными твердыми сплавами способно в 5-10 раз повысить их износостойкость в условиях контактного нагружения. Однако, при трении скольжения в услови-

3. Плазменные технологии восстановления и упрочнения деталей и инструмента / В.А. Коротков, А.А. Бердников, И.А. Толстов // Челябинск: Metallurgy, 1993.- 144 с.

Статьи

4. Проволока для наплавки гидропрессов / М.Н. Лобанов, И.А. Толстов, Н.С. Жуков, В.А. Коротков // Автоматическая сварка, 1978. - № 10. - С. 57-59.

5. Некоторые особенности наплавки тонкостенных цилиндрических деталей / В.А. Коротков, А.А. Спиридонов, И.А. Толстов, А.А. Семкин // Сварочное производство, 1981.- № 2.- С. 29-30.

6. Восстановление деталей трамвайного вагона /Тюрин Ю.О., Пугач А.П., Толстов И.А., Коротков В.А.// Сварочное производство, 1981.- № 8.- С. 31-32.

7. Коротков В.А., Толстов И.А. Новый способ крепления разгрузочных колец на бурильных трубах // М.: ВНИОНГ, РНТС "Машины и нефтяное оборудование", 1981.- № 2.- С.9-11.

8. Изотермическая закалка стали 36Г2С / М.Н. Лобанов, В.А. Коротков, И.А. Толстов // Известия ВУЗов, Черная металлургия, 1982.- № 7.- С. 134-137.

9. Коротков В.А., Толстов И.А. Рациональное применение сварочных деформаций // Тезисы конф. сварщиков Урала - Курган, 1982.- С. 150-153.

10. О термообработке замков для бурильных труб / М.Н. Лобанов, В.А. Коротков, И.А. Толстов // Известия ВУЗов, Черная металлургия, 1985.- № 9.- С. 127-128.

11. В.А. Коротков, О.В. Трошин. Расчет на прочность соединений с натягом // Свердловск: УПИ - Сб. научных трудов: Теория и практика сварочного производства, 1986.- С.66-71.

12. Расчет деформаций при наплавке втулок / В.А. Коротков, О.А. Бакши, О.В. Трошин, А.Ф. Соловьев // Свердловск: УПИ, 1986. Депонирована в Черметинформации, № 3611.

13. Коротков В.А., Толстов И.А. Свойства сварных соединений бурильных труб // Сварочное производство, 1987.- № 3.- С. 14-16.

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

15. Коротков В.А., Баскаков Л.В., Толстов И.А. Эффективность применения износостойких наплавочных материалов // Сварочное про-

изводство, 1991.- № 6.- С.21-23.

16. Циклическая закалка стали ХВГ / Зелин М.Г., Евдокимов А.И., Коротков В.А. // МИТОМ, 1992.- № 9.- С. 33-34.

17. Коротков В.А., Дубко С.Н. Упрочнение оправок раскатной клетки прокатного стана // Сварочное производство, 1992.- № 11.- С. 12-13.

18. Коротков В.А., Трошин О.В. Деформации полых цилиндров при неравномерном нагреве и охлаждении // ФХОМ, 1992.- № 6.- С. 135-141.

19. Коротков В.А., Баскаков Л.В., Дубко С.Н. Восстановление и упрочнение инструмента горячего деформирования // Сталь, 1993.- № 2.- С. 57-59.

20. Коротков В.А., Баскаков Л.В. Трещиностойкость роликов установок непрерывной разливки стали // Сварочное производство, 1993.- № 4.

21. Коротков В.А., Зелин М.Г., Шустер Л.Ш. Исследование износостойкости хромовольфрамовой штамповой стали в различном структурном состоянии // Трение и износ, 1993.- № 5.- С. 860-864.

22. Коротков В.А., Трошин О.В. Трещинообразование при многослойной наплавке // ФХОМ, 1993.- № 6.- С. 133-139.

23. Коротков В.А., Трошин О.В. Повышение технологичности износостойких наплавов // ФХОМ, 1994.- № 2.- С. 86-91.

24. Коротков В.А., Киричков А.А., Зудов Е.Г. Внедрение научных достижений на НТМК с привлечением малого бизнеса // Сталь, 1995.- № 1.- С.66-68.

25. Коротков В.А., Трошин О.В., Бердников А.А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности - ФХОМ, 1995.- № 2.- С. 106-111.

26. Коротков В.А., Михайлов И.Н., Тагильцева В.Р. Наплавка нержавеющей стали.- Пермь: ПТТУ, 1995. Матер.росс.н.-техн.конференции: "Современные проблемы сварочной науки и техники "Сварка-95".- Ч.1.- С.85-87.

27. Оборудование и технология плазменной закалки валков горячей прокатки / А.А. Бердников, В.А. Коротков, А.А. Киричков и др. // - Пермь: ПТТУ, 1995. Материалы росс.науч.-тех.конф.: "Современные проблемы сварочной науки и техники "Сварка-95"- в 2-х частях. Ч.1.- С. 94-96.

28. Коротков В.А. Исследование области эффективного применения электроискрового легирования // Матер.рос.научн.-техн. конф.:

"Современные проблемы сварочной науки и техники "Сварка-95" - Пермь, 1995.- Ч.1.- С.132-134.

29. Коротков В.А., Трекин Г.Е. Упрочнение роликов МНЛЗ // Сталь, 1995.- № 12.- С.33-35.

30. Коротков В.А. Влияние термомодеформационных процессов на образование трещин при наплавке // Сварочное производство, 1995.- № 11.- С.14-17.

31. Коротков В.А., Трекин Г.Е., Кабанов Д.В. Исследование электроискрового легирования // ФХОМ, 1995.- № 6.- С. 62-65.

32. Коротков В.А. О концепции выбора методов упрочнения // Вестник машиностроения, 1996.- № 1. С.21-22.

Авторские свидетельства

33. А.с. 772788 Способ сборки деталей типа вал-втулка /В.А. Коротков, И.А. Толстов, А.А. Спиридонов, А.Г. Немчинов //Бюлл. изобр., 1980, № 39.

34. А.с. 1017462 Способ восстановления деталей типа втулок / В.А. Коротков, А.И. Евдокимов, И.А. Толстов, О.В. Трошин // Бюлл. изобр., 1983, № 18.

35. А.с. 1303314 Способ дуговой сварки многослойных швов / П.П. Артемов, В.А. Коротков, И.А. Толстов, В.А. Шапарев // Б.И., 1987.- №14.

36. А.с. 1303315 Способ дуговой сварки многослойных кольцевых швов / П.П. Артемов, В.А. Коротков, И.А. Толстов, В.К. Шапарев // Б.И., 1987.- № 14.

37. А.с. 1544544 Способ сборки соединений типа вал-втулка / В.А. Коротков, П.П. Артемов, О.В. Трошин и др. // Бюлл.изобр., 1990, № 7.

38. А.с. 1671706 Способ восстановления стальных деталей / Коротков В.А., Бердников А.А. // Бюлл. изобр., 1991 г., № 31.