

тов типа широкого ужима (пологая раковина), плены и волосовины куду собой.

В декабре 1967 г. проводились межведомственные испытания, после которых была изготовлена опытная партия установок ИПН-3 (шесть шт.). Две установки переданы первоуральскому Новотрубному заводу. Путеводная промышленная эксплуатация, в течение которой с помощью однокатушечных индукционных преобразователей было проконтролировано около 5 миллионов метров котельных труб, показала надежность и удобство применения установки ИПН-3 в условиях производственного потока. Набранная статистика подтвердила, что дефекты глубиной более 10% от толщины стенки трубы обнаруживаются уверенно.

НИИ интроскопии

Поступила в редакцию
19 марта 1968 г.;
окончательный вариант —
13 августа 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ощепков П. К., Клюев В. В. и др. Дефектоскопия, 1966, № 6, 35.
2. Ощепков П. К., Клюев В. В. и др. Дефектоскопия, 1967, № 1, 44.
3. Зацепин Н. Н. и Щербинин В. Е. Дефектоскопия, 1966, № 5, 50, 59.
4. Кифер И. И. и Цепляева М. С. Сб. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий, М., ОНТИПРИБОР, 1964, 308.
5. Зацепин Н. Н. и Горбов Ф. М. Сб. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий, М., ОНТИПРИБОР, 1964, 334.
6. Мизюк Л. Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкоточных магнитных полей, Киев, изд. «Научная мысль», 1964.

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ДЛЯ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ¹

*М. Н. Михеев, В. М. Морозова, В. С. Боченков, Н. В. Ремез
и Г. В. Сурин*

Излагаются магнитные методы контроля качества отжига, закалки и низкотемпературного отпуска рабочих валков холодной прокатки.

Прокатные валки станов холодной прокатки изготавливаются из высокоуглеродистых хромистых сталей (9Х, 9Х2, 9Х2В и др.). Основная производственная характеристика таких валков — активный закаленный слой, равный 3% радиуса бочки, с твердостью не менее 59RC и достаточной механической прочностью — формируется в основном при окончательной термической обработке в виде закалки на мартенсит и следующего длительного низкотемпературного отпуска при 150—180°С. Перед закалкой валки проходят предварительную термическую обработку в виде отжига с целью создания в них структуры равномерно распределенного зернистого перлита.

Нарушение режима термической обработки на любой операции приводит к резкому снижению качества прокатных валков. Валки выходят

¹ Доложено на V Всесоюзной конференции по неразрушающим методам контроля 1967 г., Свердловск.

из строя из-за поломки, выкрашивания и быстрого износа активного закаленного слоя вследствие недогрева или перегрева при закалке, повышенного количества остаточного аустенита в активном закаленном слое, малой толщины последнего, недоотпуска, переотпуска и др. Для обеспечения высокого качества валков необходимо разработать и внедрить в производство экспрессные неразрушающие методы раздельного контроля исходной структуры перед закалкой, глубины активного закаленного слоя, количества остаточного аустенита в нем и качества низкотемпературного отпуска.

Настоящая статья посвящена описанию неразрушающих магнитных методов контроля качества прокатных валков холодной прокатки, разработанных лабораторией магнитного структурного анализа Института физики металлов АН СССР в содружестве с физической лабораторией НИИТАЖМАШ УЗТМ.

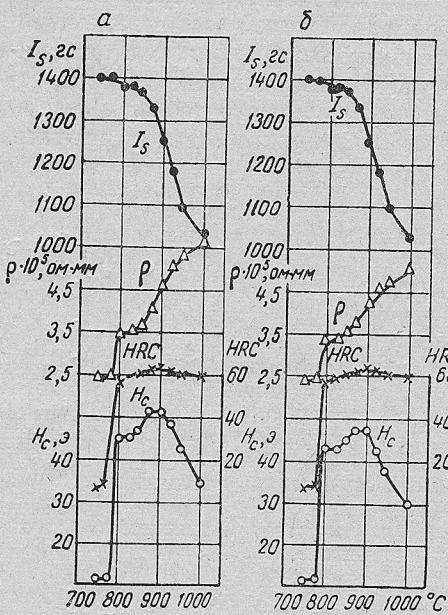
1. Магнитный контроль глубины активного закаленного слоя и количества остаточного аустенита в нем. Исследования показали, что с повышением температуры закалки по мере растворения избыточных карбидов и роста содержания парамагнитного остаточного аустенита увеличивается удельное электрическое сопротивление ρ и убывает намагниченность насыщения I_s закаленной стали, возрастающая, проходит через максимум при $T_{зак} = 880^\circ$ и затем несколько убывает (рис. 1а).

Рис. 1. Зависимость физических свойств стали 9Х2 от температуры закалки:
а — после закалки; б — после закалки и отпуска при 140°C .

ной стали 9Х2. Коэрцитивная сила максимум при $T_{зак} = 880^\circ$ и затем несколько убывает (рис. 1а).

Низкотемпературный отпуск при 140° снижает значения коэрцитивной силы и удельного электросопротивления на 10—15% и почти не изменяет намагниченность насыщения (рис. 1б). Однако при колебаниях температуры и длительности отпуска изменения перечисленных свойств могут быть значительно больше: например, изменение H_c при повышении температуры отпуска достигает 50%.

Таким образом, валковые стали с исходной температурой зернистого перлита, закаленные от $800—900^\circ$, резко отличаются от незакаленных по коэрцитивной силе, тогда как по намагниченности насыщения различие составляет около 5%. Коэрцитивная сила структур, полученных закалкой от $800—870^\circ$, различается не более чем на 15%. Это позволило разработать магнитный метод определения глубины активного закаленного слоя на валках холодной прокатки после объемной закалки от температур не выше 840° [1]. Сущность этого метода заключается в локальных измерениях коэрцитивной силы на бочке валка с помощью коэрцитиметра с приставным электромагнитом [2], обеспечивающим глубину проникновения магнитного потока в изделие на 20—25 мм [3]. Благодаря резкому различию в магнитных свойствах активного закаленного слоя, переходного слоя и мягкого основания (сердцевины валка) измеренная таким образом средняя коэрцитивная сила I_p будет зависеть от глубины активного закаленного слоя d . Градуировка коэрци-



диаметра на валках холодной прокатки объемной закалки показала [4] различие прямолинейной зависимости между I_p и d (рис. 2). При этом точность определения глубины такого слоя по измерениям средней коэрцитивной силы составляет $\pm 1 \text{ мм}$.

Технология поверхностной закалки валков холодной прокатки с помощью токов промышленной частоты (ТПЧ) [5], напротив, характеризуется повышенными температурами закалки от 880 до 940°. Для определения величины d на валках холодной прокатки, закаленных по технологии ТПЧ, предложенным выше методом получается несколько градуировочных прямых [6], отнесенных к различным температурам закалки (рис. 3). В этом случае без знания температуры закалки определя-

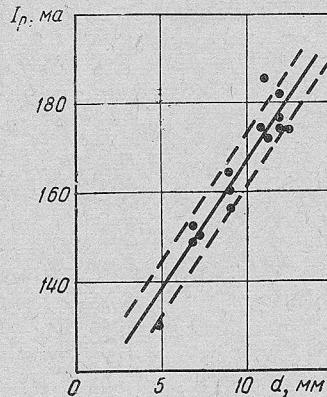


Рис. 2. Зависимость значений I_p от глубины активного закаленного слоя d валков холодной прокатки объемной закалки.

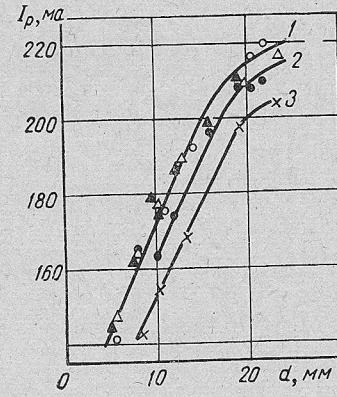


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для закалки ТПЧ:
 ○ — 880; △ — 910; × — 900 (сталь 9Х2);
 ▲ — 880; ● — 900° (сталь 9Х2В).

ние глубины активного закаленного слоя по измерениям средней коэрцитивной силы не обеспечивает необходимой точности вследствие снижения H_c самого слоя [7] при высоких $T_{зак}$ (см. рис. 1).

Метод определения глубины активного закаленного слоя на валках, обрабатываемых по технологии ТПЧ, был создан нами на основе измерений двух магнитных характеристик: намагниченности насыщения и коэрцитивной силы. Измерение намагниченности, близкой к насыщению, в магнитном поле ~ 300 э и средней коэрцитивной силы производится локально на бочке валка с помощью разработанного нами комбинированного магнитного прибора. Последний сочетает в себе качества дифференциального магнитного прибора [8] и коэрцитиметра [2] и состоит из трех отдельных частей (рис. 4): приставного двухъяремного, приставного П-образного электромагнита и пульта управления. Сечение полюсов двухъяремного электромагнита составляет $15 \times 10 \text{ мм}$, а расстояние между центрами полюсов — 42 мм ; П-образного — соответственно 32×46 и 95 мм . Геометрия полюсов обеспечивает измерение двухъяремным электромагнитом намагниченности насыщения поверхностного слоя толщиной 3—5 мм , а П-образным — средней коэрцитивной силы данного слоя толщиной до 20 мм .

В средней части ярма обоих электромагнитов помещены феррозонды рамочного типа [9]. В двухъяремном электромагните феррозонд измеряет разность магнитных потоков, ответвляющихся в среднюю часть ярма при неравенстве магнитных сопротивлений, замыкающих I и II

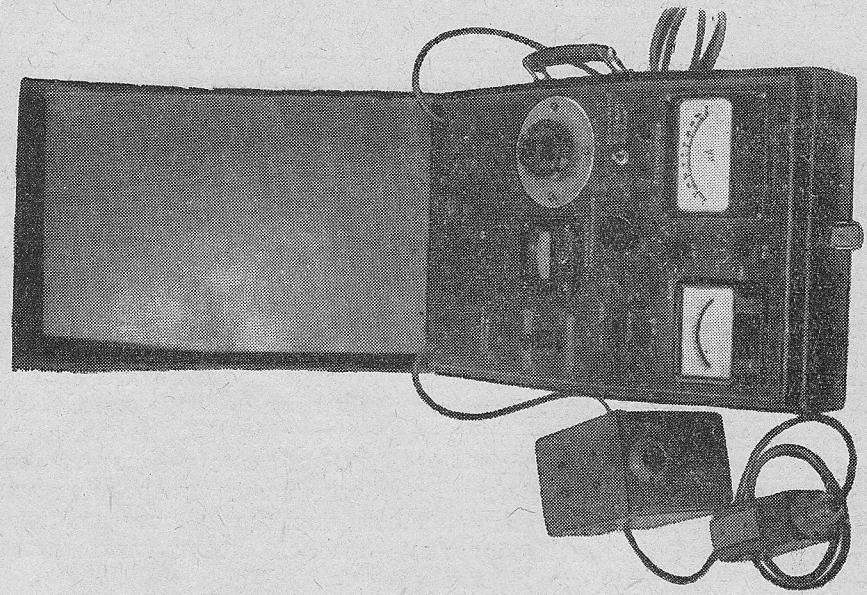
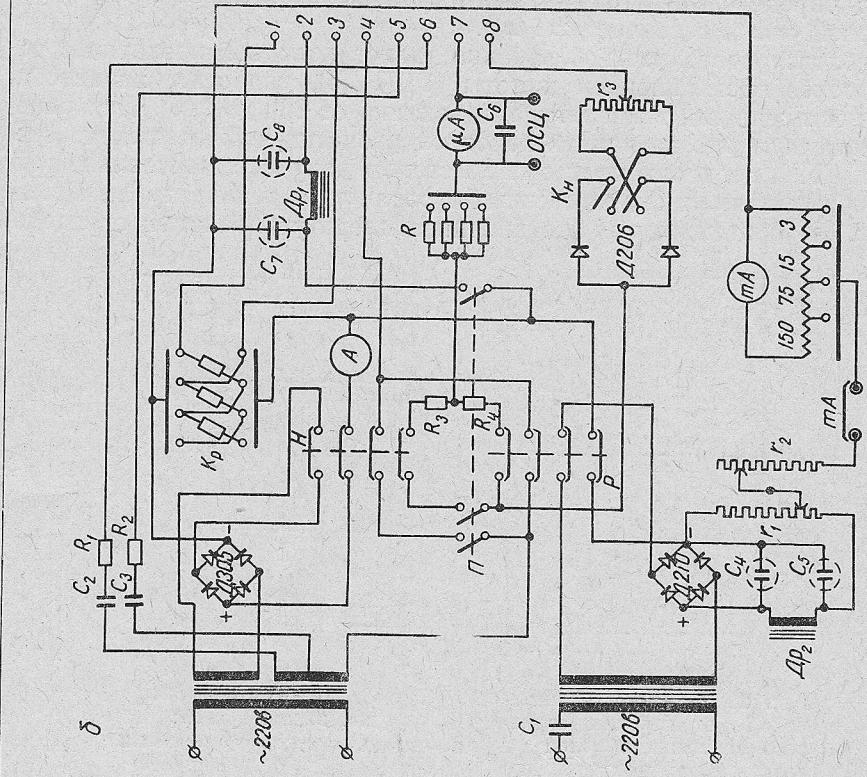


Рис. 4. Комбинированный магнитный прибор:
а — внешний вид; б — принципиальная электрическая схема.

ярма; в П-образном он определяет отсутствие магнитного потока в ярме при измерении коэрцитивной силы. Напряжение измерительной обмотки выпрямляется фазочувствительным выпрямителем [10] и измеряется микроамперметром μA . Обмотки возбуждения феррозондов питаются от сети переменного тока напряжением 220 в, частотой 50 гц, обеспечиваяющим намагничающее поле не менее 20 э. Намагничающие и размагничающие цепи приставных электромагнитов питаются постоянным напряжением, выпрямленным кремниевыми диодами Д305 и

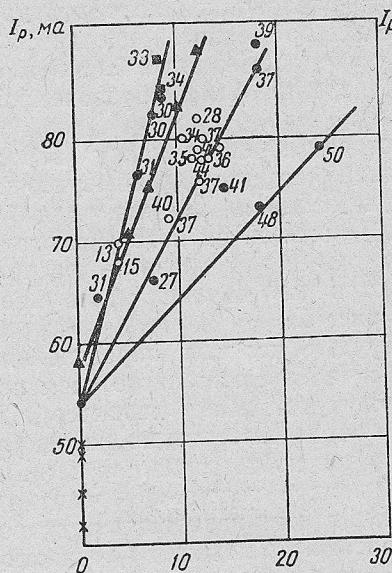
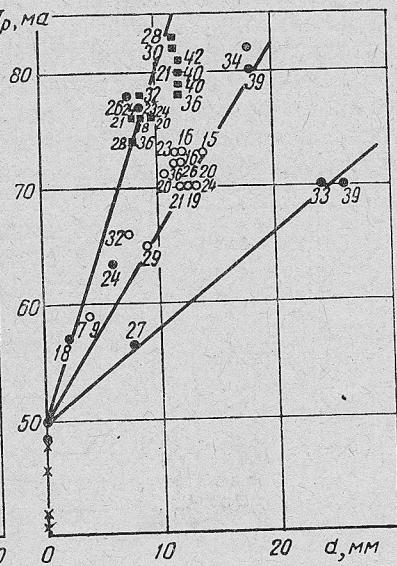
a*b*

Рис. 5. Зависимость средней коэрцитивной силы от глубины активного закаленного слоя и количества остаточного аустенита (показания по намагниченности a_s) в поверхностном слое валков ходовой прокатки:

a — после закалки ТПЧ; О, ●, ■ — опытные и поточные валки; ▲ — валки объемной закалки (для сравнения); *b* — после закалки ТПЧ и низкотемпературного отпуска.

Д210. По окончании измерений магнитные полюсы на валке можно снять с помощью коммутатора размагничивания, находящегося в цепи П-образного электромагнита.

Одно из ярем двухъяремного электромагнита замкнуто пластиной закаленной конструкционной стали, магнитное сопротивление которой в режиме работы прибора равно магнитному сопротивлению находящегося между полюсами второго ярма участка валка с малым содержанием остаточного аустенита в поверхностном слое.

Испытанию подвергается участок валка длиной до 15 см, определяемый размерами П-образного электромагнита. При этом измерения ведут сначала двухъяремным, а затем П-образным электромагнитом. Время одного испытания составляет 30—40 сек. Для проверки однородности режима закалки валка измерения проводят по трем образующим бочки не менее трех раз по каждой.

При испытаниях валков комбинированным магнитным прибором непосредственно после закалки ТПЧ угол распределения точек соответствия между средней коэрцитивной силой и глубиной активного закаленного слоя достаточно широк (рис. 5а). На нижней стороне угла расположены точки с высокими показаниями по намагниченности $a_s =$

$=48 \div 50$, на верхней $\alpha_s=30 \div 33$, в середину угла попадают точки со значениями α_s до 28 и от 34 до 44 делений шкалы μA . Соответственно этим значениям α_s можно провести три градуировочные прямые для I_p и d . В зависимости от величины α_s для определения глубины активного закаленного слоя по средней коэрцитивной силе берется одна из трех прямых.

Таким образом, измерения намагниченности насыщения корректируют зависимость коэрцитивной силы валковых сталей от температуры закалки и значительно повышают точность магнитного метода определения глубины активного закаленного слоя валков холодной прокатки, прошедших закалку ТПЧ. При этом одновременно определяется и твердость активного слоя, так как слои с твердостью ниже 59 HRC имеют величину I_p меньше соответствующей вершине угла, образованного градуировочными прямыми (см. рис. 5а).

Валки с одним и кратными подогревами под закалку ТПЧ хорошо описываются кривыми рис. 5а. По-видимому, это закономерно, поскольку градуировочная прямая для валков объемной закалки, на которые похожи валки с кратными подогревами, расположена несколько ниже верхней градуировочной прямой рис. 5а.

Наилучшие условия определения глубины активного закаленного слоя по измерениям двух магнитных характеристик реализуются при измерениях на закаленных изделиях, что подтверждается данными испытаний валков холодной прокатки после прохождения ими низкотемпературного отпуска (рис. 5б). Значения I_p снижаются на 10—15%, но показания α_s уже не разделяются четко по градуировочным прямым.

По-видимому, колебания температуры отпуска в условиях длительных выдержек оказывают заметное влияние на спад остаточного аустенита. Поэтому измерения после низкотемпературного отпуска дают остаточного аустенита в поверхностном слое свое вспомогательное значение при определении глубины активного закаленного слоя по средней коэрцитивной силе.

Количество остаточного аустенита в поверхностном слое толщиной 3—5 мм можно определить по показаниям намагниченности, пользуясь градуировочным графиком рис. 6.

2. Магнитный контроль качества низкотемпературного отпуска. Контроль качества отпуска закаленных валков холодной прокатки по измерениям твердости HRC не может дать положительных результатов, так как в интервале температур отпуска до 200° она сохраняет постоянные значения, равные твердости валка после закалки [4]. Поэтому невозможно по измерениям HRC разделить партию закаленных валков, прошедших и не прошедших отпуск. В то же время I_p отпущеного валка по сравнению с ее значениями для закаленного состояния будет меньше на 10—15%. Следовательно, необходимо еще раз провести измерения средней коэрцитивной силы валков после отпуска и по снижению величины I_p по сравнению с ее значениями после закалки однозначно оценить качество низкотемпературного отпуска каждого валка.

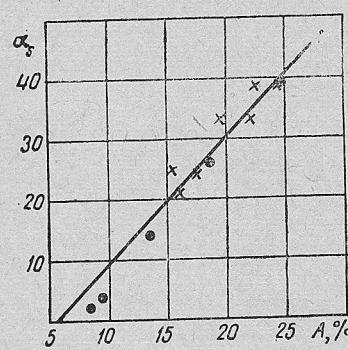


Рис. 6. Зависимость показаний по намагниченности от содержания остаточного аустенита в поверхностном слое валков холодной прокатки:
● — модели валков; × — опытные валки.

3. Магнитный контроль исходной структуры валков холодной прокатки перед закалкой. Известно, что перед закалкой заэвтектоидные стали, к которым относятся валковые (9Х, 9Х2, 9Х2В), проходят термическую обработку с целью создания в них структуры равномерно распределенного зернистого перлита. Изделия со структурой пластинчатого перлита, а также с наличием карбидной сетки обладают повышенной склонностью к трещинообразованию в процессе закалки и дают большие количества остаточного аустенита. Поэтому контроль исходной

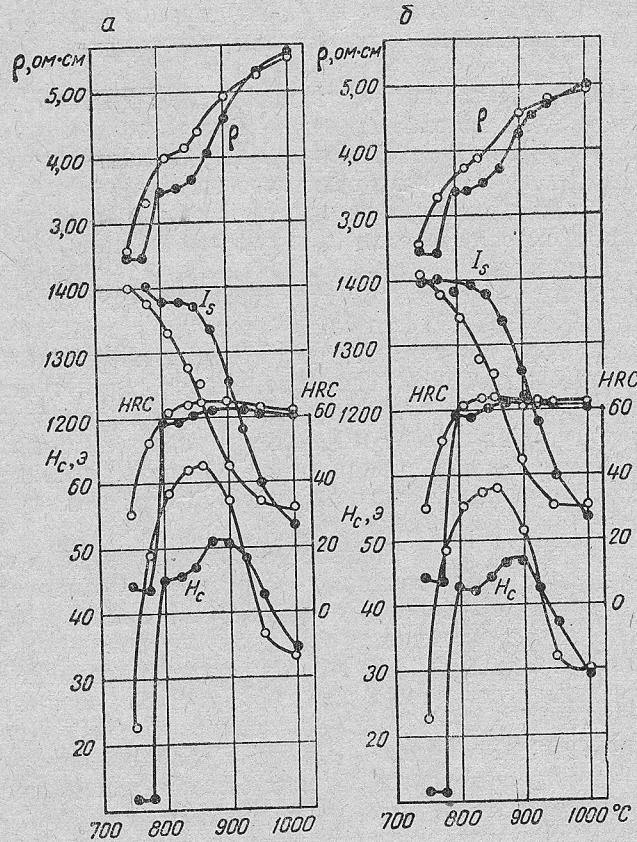


Рис. 7. Зависимость физических свойств стали 9Х2 от температуры закалки для исходных структур пластинчатого (O) и зернистого (●) перлита:

a — после закалки; б — после закалки и отпуска при 130—140° С.

структурой и направление на закалку валков только со структурой равномерно распределенного зернистого перлита весьма важны для получения качественных изделий.

Помимо этого различие исходных структур существенно влияет на величину и характер изменения магнитных свойств валковых сталей с температурой закалки. Последнее обстоятельство является возможным источником ошибок магнитного метода определения глубины активного закаленного слоя, что видно из рис. 7а. Исследованные исходные структуры стали 9Х2 отличались по коэрцитивной силе: для структуры пластинчатого перлита $H_c = 22,4$ э, для зернистого — 11,5 э; аналогичное различие наблюдалось по твердости: соответственно 23 и 2 RC. Ускоренное растворение пластинчатого перлита по сравнению с зернистым

при аустенитации обеспечивает большую насыщенность твердого γ -раствора углеродом и хромом. При последующем мартенситном превращении закаленная сталь с исходной структурой пластинчатого перлита имеет большие количества остаточного аустенита и более высокую H_c , чем сталь с исходной структурой зернистого перлита [12]. Для температур закалки выше 900° такое отличие исходных структур уже не является существенным.

Наблюдаемые различия в магнитных и электрических свойствах стали 9Х2 в закаленном состоянии из-за неодинаковости исходных структур практически полностью сохраняются и после низкотемпературного отпуска (рис. 7б).

Следовательно, нестандартность исходной структуры может обусловить широкую вариацию магнитных свойств валковых сталей даже при фиксированной температуре закалки и тем самым служить дополнительным источником ошибок магнитного метода определения глубины активного закаленного слоя. Эти ошибки могут быть исключены только путем строгого контроля исходной структуры валков холодной прокатки перед их закалкой.

Наш опыт контроля исходной структуры труб, прутков, деталей подшипников из стали ШХ15, близкой по составу к валковым сталим, на первоуральском Новотрубном заводе, ГПЗ-6 и Серовском металлургическом комбинате при помощи коэрцитиметров с приставными электромагнитами дает нам основание рекомендовать проведение контроля исходной структуры валков по измерениям коэрцитивной силы. Физической основой этого метода является зависимость коэрцитивной силы стали в высокоотпущенном состоянии от формы и величины карбидных частиц.

Измерения средней коэрцитивной силы на валках в исходном состоянии перед закалкой проводились тем же электромагнитом, который применялся для оценки глубины активного закаленного слоя. Значения I_p , полученные на улучшенных валках из производственного потока, укладываются в пределы 20—41 ма. При этом показания 20—23 ма соответствуют режиму улучшения для объемной закалки (закалка и отпуск при 780 — 790°), а 28—41 ма — для закалки ТПЧ (закалка и отпуск при 690 — 720°). Значения I_p на шейке валка, как правило, те же, что и на бочке, но в некоторых случаях отличаются: например, на шейке — 32, на бочке — 34—37 ма.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по измерениям коэрцитивной силы при помощи приставного электромагнита может быть успешно осуществлен контроль качества улучшения или отжига валков холодной прокатки. Сплошной контроль исходной структуры, легко осуществимый предложенным методом, позволит направлять на закалку изделия только со структурой равномерно распределенного мелкозернистого перлита.

Поскольку закалка ТПЧ оставляет шейки в исходном структурном состоянии, то измерения I_p на шейках валков после закалки ТПЧ позволяют судить об исходной структуре бочки валков. Максимальная вариация значений I_p на верхней и нижней шейках валков из потока составляла 20—34 ма; для опытного валка, отожженного в индукторе, — 20—44 ма. Поэтому при отсутствии сплошного контроля качества исходной структуры для исключения ошибки магнитного метода определения глубины активного закаленного слоя, вызванной неоднородностью исходной структуры, можно корректировать градуировочные прямые рис. 5а по измерениям I_p на шейках валков, прошедших закалку ТПЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения магнитных свойств валковых сталей разработана и создана аппаратура, основанная на измерениях коэрцитивной силы и намагниченности насыщения, для определения глубины активного закаленного слоя, количества остаточного аустенита в нем, контроля качества низкотемпературного отпуска и исходной структуры.

Контроль магнитными приборами качества исходной структуры, закалки и отпуска валков холодной прокатки необходимо вести раздельно: после подготовки исходной структуры, закалки и отпуска. При этом будет получена наиболее полная информация о правильности выполнения режимов всего цикла термических обработок, что позволит повысить качество таких ответственных изделий, как валки холодной прокатки.

Институт физики металлов
АН СССР
НИИТЯЖМАШ
Свердловск

Поступила в редакцию
23 мая 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Склев П. В. и Горячко В. Г. Вестник машиностроения, 1951, № 3, 47.
2. Михеев М. Н. Труды ИФМ УФАН СССР, вып. 12, 1949, стр. 157.
3. Михеев М. Н. ФММ, 1957, 5, 44; Труды ИФМ АН СССР, вып. 21, 1959, стр. 147.
4. Михеев М. Н., Морозова В. М. и др. Заводская лаборатория, 1956, № 1, 52, Труды ИФМ АН СССР, вып. 21, 1959, стр. 157.
5. Новиков В. Н., Лагерквист С. А. Труды ЦНИИТМАШ, кн. 51, Москва, Машгиз, 1953.
6. Михеев М. Н., Морозова В. М., Сачавский А. Ф., Титоров Б. Д., Боченков В. С. Труды ИФМ АН СССР, вып. 21, 1959, стр. 171.
7. Морозова В. М. и Михеев М. Н. ФММ, 1963, 15, 347.
8. Михеев М. Н., Сурин Г. В. и Томилов Г. С. Заводская лаборатория, 1960, № 11, 1306.
9. Янус Р. И., Фридман Л. А. и Дрожжина В. И. ФММ, 1955, 1, 118; Заводская лаборатория, 1955, № 10, 1193.
10. Фридман Л. А. Труды ИФМ АН СССР, вып. 21, 1959, стр. 327.
11. Михеев М. Н., Морозова В. М., Сурин Г. В., Боченков В. С. Заводская лаборатория, 1963, № 12, 1459.
12. Кузнецов И. А., Михеев М. Н. Труды ИФМ АН СССР, вып. 21, 1959, стр. 228.

УДК 620.179.14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИСТАХ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Г. С. Корзунин и М. П. Уварова

Приведены результаты измерений внутренних напряжений и коэрцитивной силы в различных участках целых листов горячекатаной электротехнической стали разного качества. Показана связь величины и характера анизотропии коэрцитивной силы с характером распределения упругих напряжений в листе.

При производстве электротехнической стали из-за неоднородного охлаждения краевых и серединных участков листов при отжиге их в стопе создаются внутренние напряжения первого рода. Чем шире лист, тем больше неоднородность прогрева и охлаждения краевых и середин-