

рентным соотношениям для возрастающего индекса n [7], число удерживаемых при расчетах членов рядов обеспечивало счет с погрешностью не более 2%.

Осцилляции на кривых 2 и 3 для $|A_{\text{вкл}}^{\text{sc}}|$ и $|A_{\text{пол}}^{\text{p}}|$ объясняются существованием «ползущих» волн, возникающих на границе твердого включения в жидкости [8] и на границе полости в твердой среде, и их интерференцией с волной, отраженной по законам геометрической акустики. Средние значения всех кривых близки к энергетической кривой 5. На зависимости $|A_{\text{вкл}}^{\text{p}}|$ осцилляции отсутствуют, что указывает на незначительность вклада волн «ползущих» и других, возбуждаемых в среде вблизи границы с дефектом. Вместе с тем расчет по скалярной модели геометроакустических коэффициентов отражения $|A_{\text{пол}}^{\text{sc}}|$ дает весьма близкие к случаю точного расчета в твердой среде результаты, которые, в свою очередь, при $2b/\lambda_l > 0,4$ удовлетворительно совпадают с зависимостью Ae^n в энергетическом приближении. Зависимость $|A_{\text{пол}}^{\text{p}}|$ имеет осцилляции, связанные с возбуждением поверхностно-продольной волны на свободной сферической границе, и при возрастании $2b/\lambda_l$ она медленно приближается к энергетической кривой. Для значений $2b/\lambda_l > 0,15-0,2$ при расчетах коэффициента отражения продольных волн от сферической полости вполне оправдано применение скалярной модели.

Как следует из работы [9] и формул (2)–(8), в длинноволновом приближении

$$\left| A_{\text{вкл}}^{\text{p}} \right| \approx \frac{\varepsilon_l^3}{6\pi\rho_{12}}; \quad \left| A_{\text{вкл}}^{\text{sc}} \right| \approx \frac{\varepsilon_l^3(5-2\rho_{12})}{6\pi(2+\rho_{12})}; \quad \left| A_{\text{пол}}^{\text{p}} \right| \approx \frac{\varepsilon_l(3\varepsilon_l^2-4\varepsilon_l^2)}{24\pi}. \quad (10)$$

В работе [10] в формулах расчета коэффициентов отражения не учитывается, что реальное значение $\rho_{12} > 0$. В предельном случае $\rho_{12} \rightarrow 0$ из (10) получаем $\left| A_{\text{вкл}}^{\text{sc}} \right| \rightarrow \varepsilon_l^3 5/(12\pi)$, что соответствует коэффициенту, который вытекает из работы [10] для рассеяния в направлении источника (назад) для абсолютно жесткой сферы.

Московский горный институт
НПО ЦНИИТМАШ
Москва

Поступило в редакцию
4 февраля 1986 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981, 240 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2. Справочник. Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976, 326 с.
3. Данилов В. Н., Ямщиков В. С. К расчету коэффициентов отражения упругих волн от цилиндрической полости. — Дефектоскопия, 1984, № 4, с. 80–81.
4. Ямщиков В. С., Данилов В. Н., Шкурятник В. Л., Ермолин А. А. Отражение продольных упругих волн, возбуждаемых дисковым излучателем, от шаровой неоднородности в полупространстве. — Дефектоскопия, 1983, № 4, с. 76–83.
5. Гузь А. Н., Кубенко В. Д., Черевко М. А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978, 308 с.
6. Рао У. Н., Моу С. С. Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle. — J. Appl. Phys., 1963, 34, № 3, p. 493–499.
7. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. М.: Наука, 1974, 295 с.
8. Хёпл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. М.: Мир, 1964, 333 с.
9. Данилов В. Н. Об использовании скалярных моделей для расчетов акустических трактов дефектоскопов на продольных волнах. — Дефектоскопия, 1985, № 12, с. 95–96.
10. Скучик Е. Основы акустики. Т. 2. М.: Мир, 1976, 542 с.

УДК 620.179.14

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ МАРОК 20Г1ФЛ И 20ФЛ

И. А. Вайс, Ю. П. Башкиров, Е. Д. Сакович, А. Э. Иванский,
Г. В. Бида, В. Е. Стрелянов

На ПО «Уралвагонзавод» из стали марок 20Г1ФЛ и 20ФЛ (ТУ 24.05.486—82) изготавливают ответственные литые детали вагона (боковая рама, наддрессорная балка, корпус автосцепного устройства, тяговый хомут, корпус роликовой буксы и т. д.).

Для получения заданного уровня механических свойств отливки подвергают нормализации при 930°С. Механические свойства стали контролируют по результатам испытания образцов, изготовленных из пробных брусков по ГОСТ 977—75. ([1], черт. 1). Сдаточными характеристиками являются: предел текучести σ_t , относительное удлинение δ , а также для стали 20Г1ФЛ—ударная вязкость при температуре испытания —60°С (КСУ⁻⁶⁰), для стали 20ФЛ—ударная вязкость при температуре испытания 20°С (КСУ⁺²⁰). Кроме того, для обеих марок сталей определяют факультативно: временное сопротивление разрыву σ_b и относительное сужение ψ . Описанный метод контроля трудоемок, характеризуется значительными погрешностями, часты случаи переиспытаний из-за некачественного изготовления образцов или отклонений от нормальных условий испытаний (раковина в образце, разрыв по керну или в нерабочей зоне и т.д.); при этом нет возможности определять механические свойства металла непосредственно в отливках.

Ранее была показана возможность контроля механических свойств, определяемых испытаниями на растяжение, стали марки 20Г1ФЛ в нормализованном состоянии по измеренным значениям коэрцитивной силы [2, 3]. Сталь марки 20ФЛ близка по химическому составу и свойствам к стали 20Г1ФЛ. В настоящее время разработана, согласована с МПС и внедрена «Методика неразрушающего магнитного контроля механических свойств стали марок 20Г1ФЛ и 20ФЛ при прямо-сдаточных испытаниях литых деталей вагона». Методическим руководством при разработке методики послужил ОСТ 14.34—78 [4].

В течение длительного периода (более полугодя) в процессе сдаточного производственного контроля собраны массивы данных, включающие более 1000 плавов стали каждой марки. В них вошли результаты определения механических свойств на растяжение, полученные на одном разрывном образце, а также значения тока размагничивания I_p пробного бруска, измеренные коэрцитиметром КИФМ-1. Из этих массивов с помощью таблицы случайных чисел были сформированы две выборки, объемом по 200 плавов каждая. Методом наименьших квадратов рассчитаны линейные уравнения регрессии, связывающие механические свойства стали с величиной тока размагничивания, а также соответствующие им парные коэффициенты корреляции r и остаточные средние квадратические отклонения $S_{ост}$. Полученные результаты приведены в таблице. Коэффициенты корреляции и коэффициенты регрессии значимы

Результаты статистической обработки данных

Марка стали	Уравнение регрессии	r	$S_{ост}$	S_{σ}
20Г1ФЛ	$\sigma_t = 241,4 + 8,0I_p$	0,72	20,0 МПа	15,0 МПа
	$\sigma_b = 331,4 + 12,0I_p$	0,85	19,0 МПа	14,0 МПа
	$\delta = 33,37 - 0,44I_p$	-0,40	2,5%	1,9%
	$\psi = 62,44 - 0,75I_p$	-0,30	6,0%	5,0%
20ФЛ	$\sigma_t = 190,0 + 10,0I_p$	0,73	25,0 МПа	—
	$\sigma_b = 290,8 + 12,9I_p$	0,79	25,0 МПа	—
	$\delta = 44,50 - 1,00I_p$	-0,30	3,5%	—
	$\psi = 76,65 - 1,55I_p$	-0,20	6,2%	—

при доверительной вероятности не ниже 0,95. Уравнения регрессии адекватны при доверительной вероятности не ниже 0,95.

На величину $S_{ост}$ оказывают влияние как недостаточная теснота связи между механическими свойствами стали и током размагничивания, так и ошибки измерения механических свойств стали прямым методом, причем влияние ошибок измерения более значительно. В этом можно убедиться, сравнив $S_{ост}$ с соответствующими среднеквадратическими ошибками эксперимента S_{σ} , характеризующими точность определения механических свойств стали существующим разрушающим методом. Величины S_{σ} были рассчитаны для стали 20Г1ФЛ по результатам испытания двух образцов от каждой плавки, изготовленных из одного пробного бруска.

Кроме уравнений, приведенных в таблице, рассчитаны квадратичные уравнения связи механических свойств стали с током размагничивания коэрцитиметра и линейные уравнения множественной регрессии с учетом плавочного химического состава стали. Также были рассчитаны соответствующие этим уравнениям множественные коэффициенты корреляции и $S_{ост}$. Эти варианты уравнений не дали значительного увеличения коэффициентов корреляции и существенного снижения величины $S_{ост}$, но их применение усложнило бы методику контроля, поэтому в ней использован вариант линейных уравнений регрессии только с I_p .

Результаты, приведенные в таблице, были положены в основу методики. Контроль механических свойств стали осуществляют следующим образом. На пробном бруске плавки, поступившей на контроль, измеряют ток размагничивания коэрцитиметром КИФМ-1. Если I_p попадает в интервал годности, в котором с заданной вероятностью механические свойства плавки соответствуют требованиям нормативно-тех-

нической документации, то данную плавку принимают, а величину I_p по соответствующей таблице переводят в значения механических свойств стали. Если же I_p не попадает в указанный интервал годности, то из пробного бруска изготавливают образец и испытывают на растяжение по ГОСТ 1497—73. Необходимым условием применения неразрушающего магнитного метода контроля (НММК) является стабильный технологический процесс производства деталей. На протяжении всего времени применения НММК ведется контроль за стабильностью оценки механических свойств стали магнитным методом. Для осуществления контроля стабильности технологического процесса и стабильности оценки механических свойств стали НММК параллельным испытаниям по ГОСТ 1497—73 и НММК подвергается каждая плавка (контрольная плавка) данной марки стали. Предусмотрена корректировка уравнений регрессии.

За пять месяцев 1985 г. неразрушающим магнитным методом было проконтролировано 1614 плавки стали 20Г1ФЛ и 2320 — стали 20ФЛ. На прямой контроль (по ГОСТ 1497—73) было отправлено 386 плавки (24%) стали 20Г1ФЛ и 487 (21%) — стали 20ФЛ. Сюда вошли плавки, не принятые НММК, а также контрольные плавки. По результатам испытаний прямым методом были выявлено 35 бракованных плавки стали. Причинами брака явились отклонения плавочного химического состава стали, а также повышенная скорость охлаждения при нормализации.

Описанная методика проста, надежна и позволяет на 75—80% сократить изготовление разрывных образцов. Однако наиболее полно преимущества неразрушающего магнитного контроля будут реализованы при переходе на контроль непосредственно отливок. Для этого предстоит решить ряд задач: разработать методику контроля ударной вязкости стали и качества нормализации отливок, повысить точность НММК, получить уравнения регрессии, связывающие механические свойства непосредственно отливок с параметрами НММК.

Авторы благодарят А. А. Лифшица за помощь в обработке статистических данных и Л. Н. Косарева за содействие в разработке методики.

ПО «Уралвагонзавод»
имени Ф. Э. Дзержинского
Институт физики металлов
УНЦ АН СССР

Поступило в редакцию
14 августа 1985 г.;
в окончательном варианте —
5 марта 1986 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 977—75. Отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали. Общие технические условия.
2. Башкиров Ю. П., Вайс И. А., Бида Г. В., Сакович Е. Д., Иванский А. Э., Стрелянов В. Е. Неразрушающий метод контроля механических свойств отливок из стали 20Г1ФЛ после нормализации. — Дефектоскопия, 1985, № 3, с. 21—24.
3. Башкиров Ю. П., Вайс И. А., Стрелянов В. Е., Иванский А. Э., Дудакова В. М. Контроль механических свойств литой нормализованной стали 20Г1ФЛ коэрцитиметром КИФМ-1. — Тезисы докл. 4-й научно-технической конференции «Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение». Свердловск, 1983, с. 18.
4. ОСТ 14.34—78. Статистический контроль качества металлопродукции по корреляционной связи между параметрами.

УДК 620.179.15

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНО-ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНОВ

С. А. Воробьев, А. Д. Погребняк, В. М. Кушнарченко, А. В. Маняченко,
Ш. М. Рузимов, Н. И. Шабанов

Метод аннигиляции позитронов (МАП) широко используется для исследования вакансий, дислокаций, границ зерен в металлах и сплавах вследствие высокой чувствительности и избирательности позитронов к областям с пониженной электронной плотностью. Результаты исследований, проведенных с помощью МАП в последнее время, показали его перспективность для прогнозирования износостойкости [1], циклической усталости [2] материалов и изделий и послужили основанием для изучения структурно-физического состояния сварных соединений.

Сварные образцы размером $10 \times 20 \times 180$ мм стали Ст20 вырезали из сварного стыка трубопровода; фрезерованием, шлифованием, а затем полированием подготавливали для измерений их внешнюю поверхность таким образом, чтобы уменьшить до минимума весь нарушенный слой, образованный в процессе резки образцов. Часть образцов наводороживали в водном растворе 12,5% $H_2SO_4 + 3$ г/л $Na_2S_2O_3$ в тече-