

УДК 669.01

О.А. Чикова¹, В.С. Цепелев¹, В.В. Вьюхин¹, А.В. Белонос²¹ Уральский федеральный университет² Уральский государственный педагогический университет

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ВЯЗКОСТЬ ЖИДКИХ СТАЛЕЙ 9Х2МФ И 75Х3МФ

Аннотация. Проведено вискозиметрическое исследование жидких сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ, отобранных от рабочих валов реверсивного прокатного стана, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн. По результатам измерений сделано заключение о характере влияния дефектов, регистрируемых ультразвуковым методом, на характер температурных и временных зависимостей кинематической вязкости жидких сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ. Ультразвуковой контроль проводился с использованием УЗ дефектоскопа фирмы Krautkramer. Вязкость жидких сталей измерялась методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов в диапазоне температур от 1500 до 1580 °С.

Ключевые слова: вязкость, ультразвуковой контроль, дефекты, сталь.

THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE VISCOSITY OF THE LIQUID STEEL AND 9H2MF 75H3MF

Abstract. Viscometric study conducted 9H2MF liquid steel and 75H3MF taken from the drive shafts reversing mill, characterized by varying degrees of attenuation of ultrasonic waves. From the measurements, the conclusion about the nature of the influence of defects detected by ultrasound method, the nature of the temperature and time dependence of the kinematic viscosity of the liquid steel and 9H2MF 75H3MF. Ultrasonic testing was conducted using ultrasonic flaw detector by Krautkramer. Viscosity was measured by liquid steel damped torsional vibration crucible melt during heating and subsequent cooling of the samples in the temperature range from 1500 to 1580 °C.

Keywords: viscosity, ultrasonic testing, defects, steel.

Ультразвуковой контроль рабочих валов реверсивного прокатного стана холодной прокатки позволяет выявить дефекты металла – несплошности, заполненные газом или шлаком. Известно, что коэффициент отражения ультразвука на границе дефекта, заполненного газом, по модулю близок к единице; для дефекта, заполненного шлаком, этот коэффициент существенно меньше; слабый отраженный сигнал дают тонкие окисные пленки [1 – 4]. Чувствительность ультразвукового контроля при этом, как правило, соответствует эквивалентному размеру дефекта диам. 5 мм. Согласно требованиям ОСТ 24.023.33-86 наличие несплошностей с эквивалентным диаметром менее 7 мм считается допустимым. Например, по всей длине бочки рабочего вала из стали 9Х2МФ в результате ультразвукового контроля была обнаружена зона несплошностей с эквивалентным диаметром $\leq 4,5$ мм, залегающая на глубине 120 – 350 мм, допустимая по ОСТ 24.023.33-86. В той же зоне обнаружены многочисленные несплошности, размер которых имеет пограничное значение (рис. 1).

Результаты металлографического изучения очагов разрушения валков свидетельствуют о повышенном содержании неметаллических включений, которые после прокатки расположены в виде строчек. Неметаллические включения (окислы, сульфиды, силикаты) появляются в изделиях из стали при попадании огнеупорного материала в жидкий металл или скопления продуктов

раскисления [5 – 6]. Качественный металлографический анализ показал наличие неметаллических включений (сульфиды 4 балла и сложные оксиды 5 балла по ГОСТ 1778-70) в зоне распространения усталостного разрушения.

Актуальный вопрос о связи дефектов строения металлических материалов, регистрируемых ультразвуковым методом, со структурным состоянием их расплавов до сих пор не обсуждался. Например известно, что наличие неметаллических включений в стали влияет на жидкотекучесть расплава, процесс кристаллизации и акустические характеристики готовых стальных изделий, однако не установлено зависимости скорости ультразвука от структуры литого металла, поэтому судить о природе

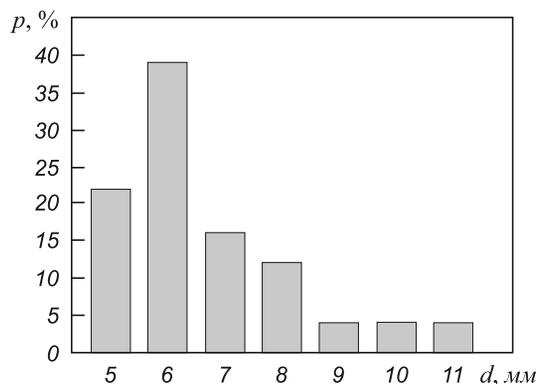


Рис. 1. Распределение несплошностей по размерам

связи акустических характеристик и структуры твердого и жидкого металла затруднительно [2 – 4].

Авторы настоящей работы предлагают перспективный способ улучшения качества изделий из сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ – гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости [7]. Этот способ позволяет получить металл с минимальным количеством дефектов и не требует высоких скоростей охлаждения [7 – 9]. Идея метода основана на предположении о том, что при температурах выше температуры ликвидус в металлической жидкости в течение длительного времени могут существовать микронеоднородности, отличные по химическому составу от окружающего расплава. Для их разрушения нужны перегревы жидкого металла до определенной для каждого состава температуры $T_{\text{гом}}$. После такого перегрева расплав необратимо переходит в состояние истинного раствора, что существенно изменяет условия его кристаллизации. Экспериментально установлено, что разрушение микронеоднородной структуры расплавов обычно сопровождается аномалиями температурных зависимостей свойств металлической жидкости, в частности вязкости. Обнаружено расхождение температурных зависимостей вязкости расплава соответствующим режимам нагрева и последующего охлаждения образца. Температуру $T_{\text{гом}}$, отвечающую необратимому переходу расплава в гомогенное состояние, в этом случае определяли по началу высокотемпературного совпадающего участка политерма нагрева и охлаждения. В вискозиметрических опытах с микронеоднородными расплавами зафиксирован аномально высокий разброс значений кинематической вязкости, зачастую не позволяющий корректно определить данную величину. При нагреве до $T_{\text{гом}}$ указанный разброс необратимо уменьшался до значений, соответствующих случайной погрешности измерений.

Работа посвящена исследованию связи между характеристиками структурного состояния жидких сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ и наличием неметаллических включений размером менее 7 мм, вызывающих повышенное затухание ультразвуковых волн. Авторы предлагают научнообоснованный режим температурно-временной обработки расплава, направленный на улучшение качества рабочих валков. Исследованы температурные и временные зависимости вязкости $\nu(t)$ расплавов сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ с целью определения температур их гомогенизации.

Объектом исследования были образцы от валка из стали 9Х2МФ и 75Х3МФ, отобранные от рабочих валов реверсивного прокатного стана, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн. Химический состав стали 9Х2МФ включает ванадий (0,01 – 0,02 %), кремний (0,25 – 0,50 %), молибден (0,2 – 0,3 %), марганец (0,2 – 0,7 %), хром (1,7 – 2,1 %) и серу (не более 0,03 %). Из поковок стали 9Х2МФ изготавливают рабочие прокатные валы.

В условиях ОАО «Уралмашзавод» проводился ультразвуковой контроль качества валков данного типа, предполагающий выявление несплошностей и других дефектов (типа трещин). Использовался переносной ультразвуковой дефектоскоп USM 35XS фирмы Krautkramer. Чувствительность контроля определялась эквивалентным диаметром несплошности, равным 5 мм.

Вязкость измеряли методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов в диапазоне температур от 1550 до 1700 °С. Измерения температурных зависимостей проводили в режиме изотермических выдержек (не менее 30 мин) со сравнительно малыми (10 – 15 °С) ступенчатыми изменениями температуры. Систематическая погрешность измерения $\nu(T)$ составляла 3 %, а случайная, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности $p = 0,95$ не превышала 1,5 %. Измерение временных зависимостей вязкости осуществляли в отдельных экспериментах. При каждой температуре проводили 15 – 40 последовательных отсчетов. Температуру поддерживали на заданном уровне с точностью 1 °С с помощью высокоточного регулятора. При проведении измерений регистрацию параметров колебаний осуществляли оптическим способом с помощью системы фоторегистрации колебаний. Экспериментальная установка, методика измерений временных и температурных зависимостей кинематической вязкости расплавов и обработки экспериментальных данных подробно описаны в работах [10 – 12]. Образцы для вискозиметрического исследования были отобраны от рабочих валков реверсивного прокатного стана из стали 9Х2МФ и 75Х3МФ, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн. Во всех опытах использовали тигли из ВеО. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 10^5 Па.

Результаты вискозиметрического исследования расплавов сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ, отобранных от рабочих валов реверсивного прокатного стана, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн, представлены на рис. 2. Для всех исследованных расплавов обнаружено переохлаждение металлической жидкости на 50 – 60 °С. Для образцов стали 9Х2МФ, имевших дефектное строение, зафиксировано расхождение политерма нагрева и охлаждения (гистерезис) – $T_{\text{гом}} = 1540$ °С. Для всех образцов при температуре 1540 °С зафиксирован повышенный (в пределах 10 %) разброс значений кинематической вязкости в режиме нагрева металла (см. рис. 2). Обращает внимание следующая особенность: релаксация вязкости к определенному среднему значению наблюдается для образца с дефектами в режиме нагрева; для образца без дефектов – в режиме охлаждения. Все вышеперечисленные факты свидетельствуют о влиянии перегрева расплава на микро-

неоднородности наследственного характера, возникающие из-за дефектов в исходном слитке. Авторы считают, что для стали 9Х2МФ целесообразно повысить температуру нагрева расплава до 1540 – 1560 °С, т.е. применить гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости.

Полученные результаты можно качественно интерпретировать с позиций представлений о микронеодно-

родном строении металлических расплавов [5]. Согласно этим представлениям при плавлении многофазного стального слитка не образуется сразу же однородный на атомном уровне раствор легирующих элементов в железе и в определенном интервале температур продолжает сохраняться микронеоднородное состояние. В той области состояний, где указанная микронеоднородность имеет достаточно крупный масштаб, отме-

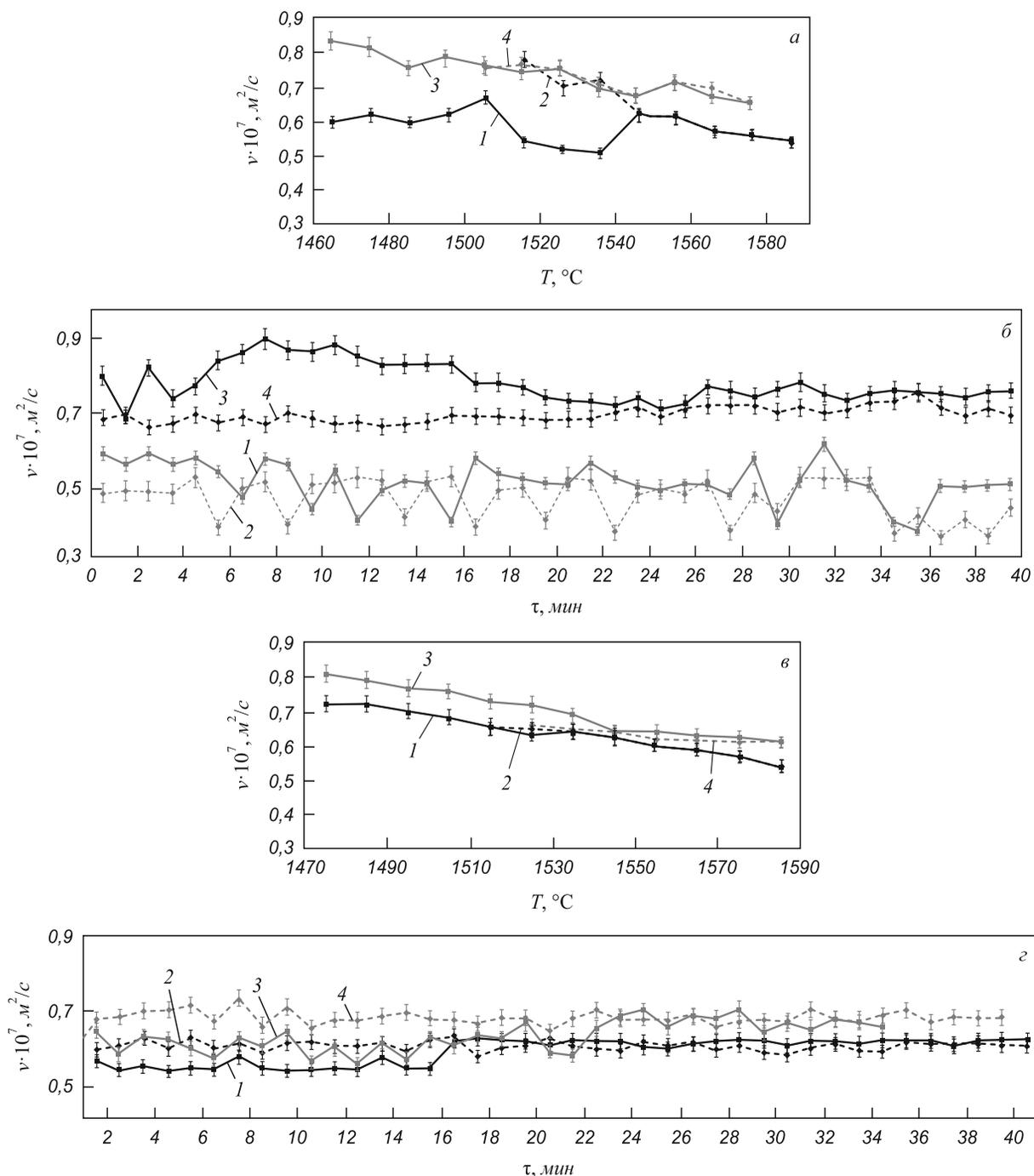


Рис. 2. Температурные и временные зависимости кинематической вязкости расплавов сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ, отобранных от рабочих валов реверсивного прокатного стана, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн:
 а – сталь 9Х2МФ: с дефектами охлаждение (1) и нагрев (2); без дефектов охлаждение (3) и нагрев (4);
 б – сталь 9Х2МФ, 1540 °С: с дефектами нагрев (1) и охлаждение (2); без дефектов нагрев (3) и охлаждение (4);
 в – сталь 75Х3МФ: с дефектами охлаждение (1) и нагрев (2); без дефектов охлаждение (3) и нагрев (4);
 г – сталь 75Х3МФ, 1540 °С: с дефектами нагрев (1) и охлаждение (2); без дефектов нагрев (3) и охлаждение (4)

чаются нестабильность фиксируемых значений вязкости. Судя по ветвлению кривых $\nu(T)$, переход расплава в состояние истинного раствора происходит лишь вблизи точек этого ветвления. Температуру $T_{\text{гом}}$, отвечающую необратимому переходу расплава в гомогенное состояние, авторы определили по началу высокотемпературного совпадающего участка политейм нагрева и охлаждения. Температура гомогенизации для жидкой стали 9Х2МФ составляет 1540 °С (см. рис. 2). Согласно работе [5], после перегрева выше $T_{\text{гом}}$ расплав стали 9Х2МФ необратимо переходит в состояние истинного раствора, что существенно изменяет условия кристаллизации металла даже при промышленных скоростях охлаждения и можно ожидать существенного повышения уровня свойств литого металла.

Выводы. Проведено вискозиметрическое исследование жидких сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ, отобранных от рабочих валов реверсивного прокатного стана, характеризующихся различной степенью затухания ультразвуковых волн. По результатам измерений сделано заключение о характере влияния дефектов, регистрируемых ультразвуковым методом, на характер температурных и временных зависимостей кинематической вязкости жидких сталей 9Х2МФ и 75Х3МФ.

Для образцов стали 9Х2МФ, имевших дефектное строение, зафиксировано расхождение политейм нагрева и охлаждения (гистерезис) – $T_{\text{гом}} = 1540$ °С.

Для всех образцов при температуре 1540 °С, в режиме нагрева, зафиксирован повышенный (в пределах 10 %) разброс значений кинематической вязкости в режиме нагрева металла.

Авторы рекомендуют для стали 9Х2МФ повысить температуру нагрева расплава до 1540 – 1560 °С, т.е.

применить гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – Санкт-Петербург: Радиоавионика, 1995. – 316 с.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – 184 с.
3. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Водилкин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
5. Атлас дефектов стали / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
6. Металлография железа: Справ. изд. / Пер. с нем. Н. Лямбер, Т. Греди, Л. Хабракен и др. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
7. Баум Б.А. Металлические жидкости. – М.: Наука, 1979. – 135 с.
8. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
9. Гельд П.В., Баум Б.А., Петрушевский М.С. Расплавы ферросплавного производства. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
10. Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Кушнир М.Н., Яковлев Г.Н. // Заводская лаборатория. 1980. № 10. С. 919 – 920.
11. Пат. 2386948 РФ. Способ бесконтактного измерения вязкости высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев. Опубл. 20.04.2010. Бюл. № 11.
12. Пат. 104721 РФ. Устройство для исследования высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев. Опубл. 25.05.2011. Бюл. 14А.

© 2013 г. О.А. Чикова, В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин,
А.В. Белоносов

Поступила 22 июля 2013 г.