

УДК 669.01

О ВЛИЯНИИ ДЕФЕКТОВ НА ВЯЗКОСТЬ ЖИДКИХ СТАЛЕЙ 32Г1 И 32Г2

Боровых М.А., аспирант кафедры физики

Вьюхин В.В., ст. научный сотрудник Исследовательского центра физики
металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

Чикова О.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (chik63@mail.ru)

Цепелев В.С., д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики
металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Проведено вискозиметрическое исследование жидких сталей 32Г1 и 32Г2, отобранных от готовых труб нефтегазового сортамента и характеризующихся различной степенью дефектности. По результатам измерений сделано заключение о характере влияния дефектов, регистрируемых магнитопорошковым и ультразвуковым методами, на характер температурных и временных зависимостей кинематической вязкости жидких сталей 32Г1 и 32Г2. Ультразвуковой контроль проводился с использованием прибора MACNDT Echomac, предназначенного для обнаружения дефектов при контроле в поточной линии. Вязкость жидких сталей измерялась методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов в диапазоне температур от 1460 до 1810 °С.

Ключевые слова: трубы нефтегазового сортамента, сталь, ультразвуковой контроль, дефекты, расплав, вязкость, микронеоднородности, температурно-временная обработка расплава.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-402-406

Ультразвуковой и магнитопорошковый контроль горячекатаных труб нефтегазового сортамента 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; тонкие окисные плены дают слабый отраженный сигнал [1 – 4]. Чувствительность ультразвукового контроля при этом, как правило, соответствует эквивалентному размеру дефекта диаметром 5 мм. Согласно требованиям ОСТ 24.023.33-86, наличие несплошностей с эквивалентным диаметром менее 7 мм считается допустимым. Результаты металлографического изучения дефектов труб свидетельствуют о присутствии неметаллических включений, загрязненность не превышает 1 балл. Неметаллические

включения (оксиды, сульфиды, силикаты) появляются в изделиях из стали при попадании огнеупорного материала в жидкий металл или скопления продуктов раскисления [5 – 6]. Например, при контроле качества труб из сталей 32Г1 и 32Г2, с помощью прибора ультразвукового контроля MAC NDT Echomac и магнитопорошкового контроля обнаруживаются несплошности глубиной до 0,35 мм, расположенные под прямым углом к поверхности (рис. 1), а также несплошности глубиной около 0,25 мм, расположенные под острым углом к поверхности (рис. 2). Вокруг несплошностей наблюдается обезуглероживание, полость заполнена окалиной.

Актуальный вопрос о связи дефектов строения металлических материалов, регистрируемых ультразвуковым и магнитопорошковым методом, со структурным состоянием их расплавов до сих пор не обсуждался.



Рис. 1. Результат металлографического изучения дефекта в образце, отобранном от трубы из стали 32Г1 (обнаружен в результате магнитопорошкового контроля)

Fig. 1. The result of metallographic investigation of the defect in the sample taken from the pipe of steel 32Г1 (detected as a result of magnetic particle inspection)

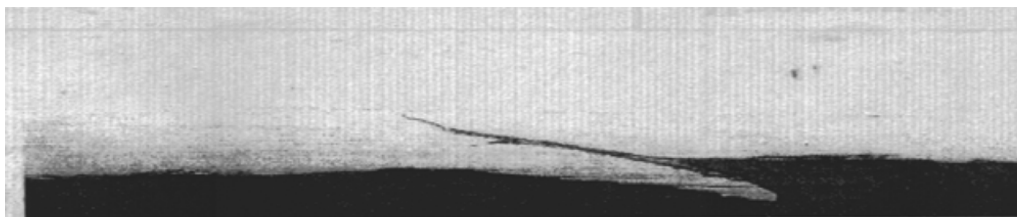


Рис. 2. Результат металлографического изучения дефекта в образце, отобранном от трубы из стали 32Г2 (обнаружен в результате ультразвукового контроля)

Fig. 2. The result of metallographic investigation of the defect in the sample taken from the pipe steel 32G1 (detected as a result of ultrasonic testing)

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

Авторы настоящей работы предлагают перспективный способ улучшения качества изделий из сталей 32Г1 и 32Г2 – 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 политерм нагрева и охлаждения.

Работа посвящена исследованию связи между характеристиками структурного состояния жидких сталей 32Г1 и 32Г2 и наличием неметаллических включений, обнаруживаемых при ультразвуковом или магнитопорошковом контроле. Авторы предлагают научно-обоснованный режим температурно-временной обработки расплава, направленный на улучшение качества горячекатаных труб. Исследованы температурные и временные зависимости вязкости $\nu(t)$ расплавов сталей 32Г1 и 32Г2 с целью определения температур их гомогенизации $T_{\text{гом}}$.

Объект исследования – образцы, отобранные от труб из стали 32Г1 и 32Г2, характеризующихся различной степенью дефектности. Сталь 32Г2 содержит компоненты в следующем соотношении, % (по массе): 0,30 – 0,35 С; 0,17 – 0,37 Si; 1,20 – 1,50 Mn; не более 0,30 Cr; не более 0,20 Ni; не более 0,30 Cu; не более 0,035 S; не более 0,035 P. Элементный состав стали 32Г1 отличается содержанием марганца – 0,9 – 1,2 % (по массе).

В условиях ОАО «Синарский трубный завод» проводился ультразвуковой и магнитопорошковый контроль качества труб, предполагающий выявление несплошностей и других дефектов (типа трещин). Использовался прибор ультразвукового контроля MAC NDT Echomac. Чувствительность контроля определялась эквивалентным диаметром несплошности, равным 5 мм.

Вязкость ν измеряли методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов в диапазоне температур от 1460 до 1810 °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 труб из стали 32Г1 и 32Г2, характеризующихся различной степенью дефектности. Во всех опытах использовали тигли из ВеО. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 10^5 Па.

Результаты вискозиметрического исследования расплавов сталей 32Г1 и 32Г2, отобранных от труб, характеризующихся различной степенью дефектности, представлены на рис. 3, 4, 8, 9. Во всех опытах зафиксировано переохлаждение металлической жидкости на 100–110 °С. Для образцов стали 32Г1, имеющих дефектное строение, обнаружено расхождение политерм нагрева и охлаждения (гистерезис), $T_{\text{гом}} = 1720$ °С (рис. 3). Для образцов стали 32Г2, не имеющих дефектов, обнаружено так же расхождение политерм нагрева и охлаждения (гистерезис), $T_{\text{гом}} = 1650$ °С (рис. 9). Повышенный (в пределах 10 %) разброс значений кинематической вязкости имел место для всех образ-

цов, имеющих дефекты (рис. 5, 6). Для образцов без дефектов обращает внимание следующая особенность временных зависимостей вязкости: релаксация к определенному среднему значению (рис. 7). Все вышеперечисленные факты свидетельствуют о влиянии перегрева расплава на микронеоднородности наследственного характера, возникающие из-за дефектов в исходном слитке. Авторы считают, что для стали 32Г2 целесообразно повышать температуру нагрева расплава до 1650–1670 °С, а для стали 32Г1 – до 1720–1750 °С, т. е. применять гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости.

Полученные результаты можно качественно интерпретировать с позиций представлений о микронеоднородном строении металлических расплавов [5]. Согласно

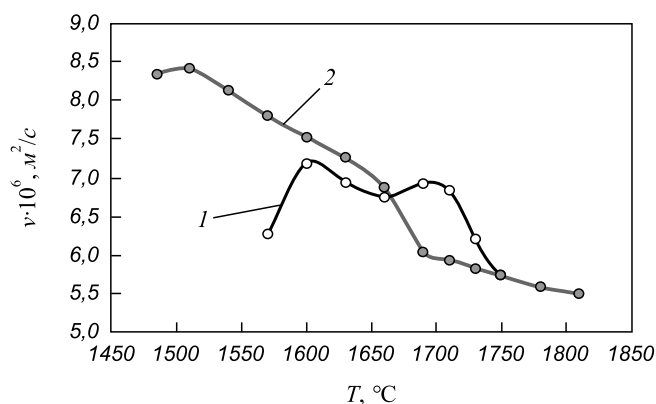


Рис. 3. Температурная зависимость вязкости жидкой стали 32Г1 с дефектами:
1 – нагрев до 1810 °С; 2 – охлаждение

Fig. 3. Experimental temperature dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G1 with defects:
1 – heating up to 1810 °C, 2 – cooling

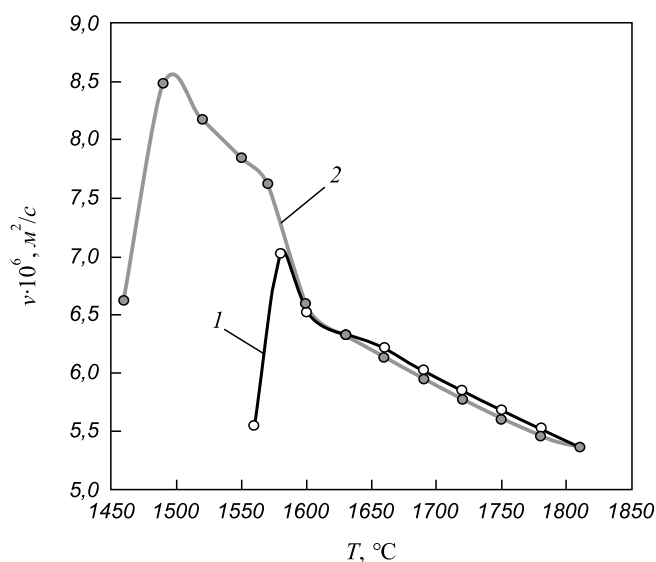


Рис. 4. Температурная зависимость вязкости жидкой стали 32Г1 без дефектов:
1 – нагрев до 1810 °С; 2 – охлаждение

Fig. 4. Experimental temperature dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G1 without defects:
1 – heating up to 1810 °C, 2 – cooling

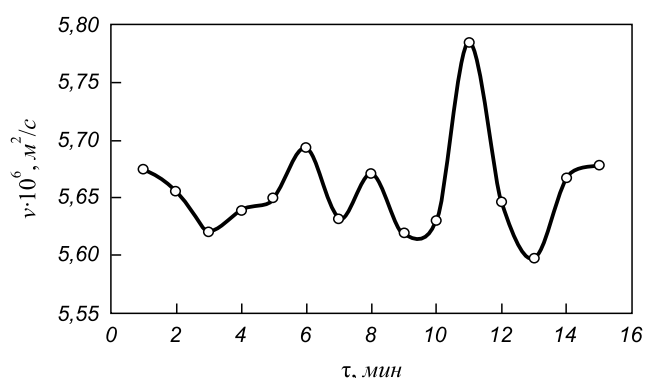


Рис. 5. Временная зависимость кинематической вязкости жидкой стали 32Г1 с дефектами: нагрев, $T = 1760$ °С

Fig. 5. Experimental time dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G1 with defects: heating, $T = 1760$ °C

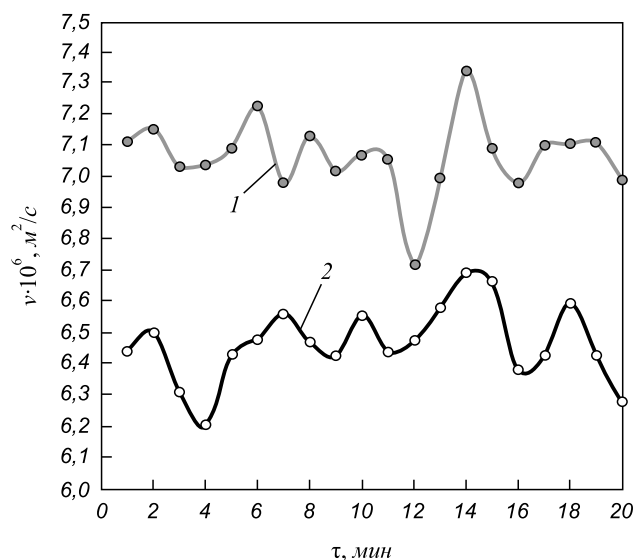


Рис. 6. Временная зависимость кинематической вязкости жидкой стали 32Г2 с дефектами:
1 – нагрев, $T = 1600$ °С; 2 – нагрев, $T = 1720$ °С

Fig. 6. Experimental time dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G2 with defects:
1 – heating, $T = 1600$ °C; 2 – heating, $T = 1720$ °C

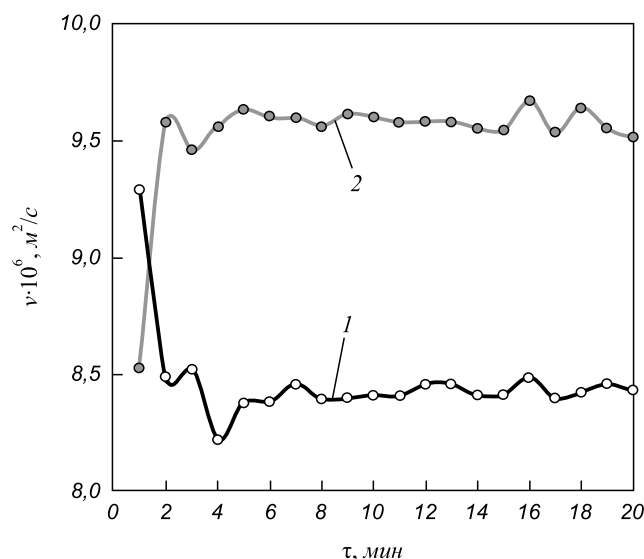


Рис. 7. Временная зависимость кинематической вязкости жидкой стали 32Г2 без дефектов:

1 – нагрев, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – охлаждение, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 7. Experimental time dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G2 without defects:

1 – heating, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – cooling, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

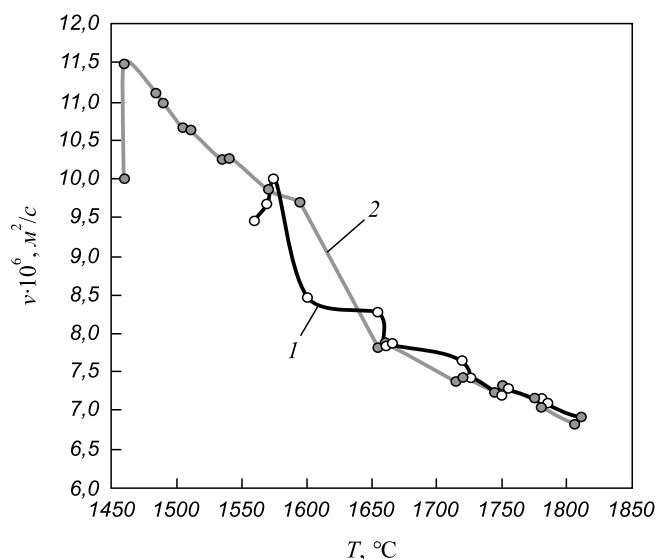


Рис. 9. Температурная зависимость кинематической вязкости жидкой стали 32Г2 без дефектов:

1 – нагрев до $1810\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – охлаждение

Fig. 9. Experimental temperature dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G2 without defects:

1 – heating up to $1810\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – cooling

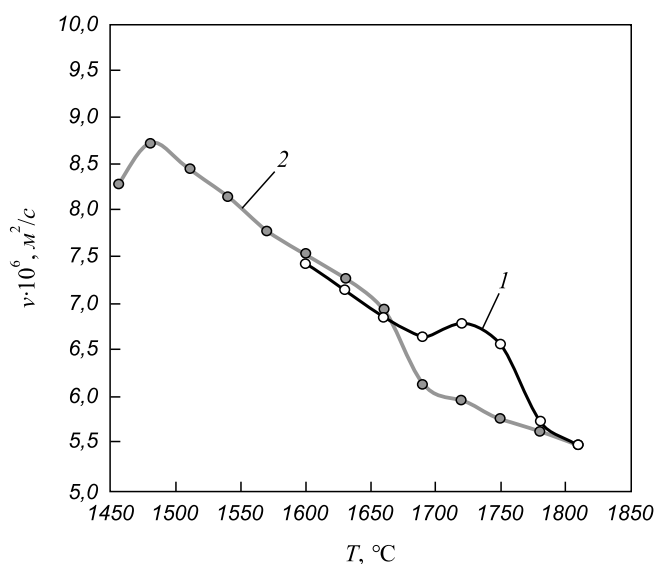


Рис. 8. Температурная зависимость кинематической вязкости жидкой стали 32Г2 с дефектами:

1 – нагрев до $1810\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – охлаждение

Fig. 8. Experimental temperature dependence of kinematic viscosity of liquid steel 32G2 with defects:

1 – heating up to $1810\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – cooling

но 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, отмечается 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 политерм нагрева и охлаждения. Для жидкой стали 32Г2 $T_{\text{гом}}$ составляет $1670\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для стали 32Г1 – $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 1). Согласно работе [5], после перегрева выше $T_{\text{гом}}$ расплав 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 32Г1 и 32Г2, отобранных от горячекатаных труб нефтегазового сортамента, характеризующихся различной степенью дефектности. По результатам измерений сделано заключение о характере влияния дефектов, регистрируемых ультразвуковым и магнитопорошковым методом, на характер температурных и временных зависимостей кинематической вязкости жидких сталей 32Г1 и 32Г2.

Для образцов стали 32Г1, имеющих дефектное строение, обнаружено расхождение политерм нагрева и охлаждения (гистерезис), $T_{\text{гом}} = 1720\text{ }^{\circ}\text{C}$; для образцов стали 32Г2, не имевших дефектов, обнаружено так же расхождение политерм нагрева и охлаждения (гистерезис), $T_{\text{гом}} = 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для всех образцов, имеющих дефекты, зафиксирован повышенный (в пределах 10 %) разброс значений кинематической вязкости.

Авторы рекомендуют для стали 32Г2 повысить температуру нагрева расплава до 1670 °С, а для стали 32Г1 – до 1750 °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. Вopilкин и др.; Под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
5. Атлас дефектов стали: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
6. Металлография сплавов 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., Кушнir М.Н., Яковлев Г.Н. Установка для измерения кинематической вязкости металлических расплавов // 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; опуб. 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; опуб. 25.05.2011. Бюл. № 14А.

Поступила 24 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 6, pp. 402–406.

THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE DUCTILITY OF LIQUID STEEL 32G1 AND 32G2

Borovykh M.A., Postgraduate of the Chair of physics
V'yukhin V.V., Senior Researcher of the Research Center of physics of metallic liquids of the Institute of Materials and Metallurgy

Chikova O.A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair of physics (chik63@mail.ru)

Tsepelev V.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of physics of metallic liquids of the Institute of Materials and Metallurgy

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The viscosimetric data on liquid steel 32G1 and 32G2 taken from working rollers of a reversible rolling mill with different ultrasonic behavior illustrate the influence of defects recorded in ultrasound monitoring of the temperature and time dependence of the liquid steel's kinematic viscosity. The samples were taken from the pipe assortment of Naftogaz. The authors made the conclusions about the nature of the influence of defects detected by the magnetic and ultrasonic methods, the nature of the temperature and time dependence of the kinematic viscosity of the liquid steel 32G1 and 32G2. The ultrasonic control was made by the defectoscope MAC NDT «Echomac» for the detection of defects at the control of the production line. The temperature and time dependences of the kinematic viscosity of the liquid steel were measured. The viscosity of the liquid steel was determined by the means of damping torsional oscillations of a crucible with the melt at heating and subsequent cooling in the range of 1460 – 1810 °C.

Keywords: Naftogaz pipe assortment, steel, ultrasonic monitoring, defects, melts, viscosity, microinhomogeneity, temperature-time processing of the melt.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-402-406

REFERENCES

1. Kretov E.F. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya v energomashinostroenii* [Ultrasonic flaw detection in power engineering]. Sankt-Peterburg: Radioavionika, 1995. 316 p. (In Russ.).
2. Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Skorost' zvuka i struktura staley i spлавov* [The speed of sound and structure of steels and alloys]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN. 1996. 184 p. (In Russ.).
3. Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya* [Ultrasonic defectoscopy]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 256 p. (In Russ.).
4. Aleshin N.P., Belyi V.E., Vopilkin A.Kh. etc. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods of acoustic testing of metals]. Aleshin N.P. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 456 p. (In Russ.).
5. *Stahlfehlerfibel*. Vols. 1–2. Freiberg Stahlberatungsstelle. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, VEB, 1975. (Russ.ed. *Atlas defektov stali*. Moscow: Metallurgiya, 1979. 188 p.).
6. Lambert Nicole, Greday Tony, Habracken Louis etc. *De Ferri Metallographia*. Vol. 4. Düsseldorf, Verl. Stahleisen, 1983. (Russ. ed. Lambert N., Greday T., Habracken L. *Metallografiya spлавov zheleza: Sprav.* Izd. Moscow: Metallurgiya, 1985. 248 p.).
7. Baum B.A. *Metallicheskie zhidkosti* [Metallic liquids]. Moscow: Nauka, 1979. 135 p. (In Russ.).
8. Baum B.A., Khasin G.A., Tyagunov G.V. etc. *Zhidkaya stal'* [Liquid steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 208 p. (In Russ.).
9. Gel'd P.V., Baum B.A., Petrushevskii M.S. *Rasplavy ferrosplavnogo proizvodstva* [Melts of ferroalloy production]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 288 p. (In Russ.).
10. Tyagunov G.V., Tsepelev V.S., Kushnir M.N., Yakovlev G.N. The device for measuring the kinematic viscosity of metallic melts. *Zavodskaya laboratoriya*. 1980, no. 10, pp. 919–920. (In Russ.).
11. Povodator A.M., Konashkov V.V., V'yukhin, V.V., Tsepelev V.S. *Sposob beskontaktnogo izmereniya vyazkosti vysokotemperaturnykh metallicheskikh rasplavov* [Non-contact measurement method for viscosity of high-temperature molten metal]. Patent RF no. 2386948, *Byulleten' izobretenii*. 2010, no. 11. (In Russ.).
12. Povodator A.M., Konashkov V.V., V'yukhin, V.V., Tsepelev V.S. *Ustroistvo dlya issledovaniya vysokotemperaturnykh metallicheskikh rasplavov* [The device for investigation of high-temperature metal melts]. Patent RF no. 104721, *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 14A. (In Russ.).

Received October 24, 2014