

УДК 669.01

СВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 40X24H12CЛ С ИХ МИКРОСТРУКТУРОЙ И ВЯЗКОСТЬЮ РАСПЛАВА

Конашков В.В.¹, к.т.н., ст. науч. сотрудник Исследовательского центра физики

металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

Цепелев В.С.¹, д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики

металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

Чикова О.А.¹, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (chik63@mail.ru)

Белоносов А.В.², аспирант

¹ Уральский федеральный университет

(620002, Россия, г. Екатеринбург ул. Мира, 19)

² Уральский государственный педагогический университет

(620017, Россия, г. Екатеринбург, пр. Космонавтов, 26)

Аннотация. Проведено металлографическое исследование микроструктуры литых образцов стали 40X24H12CЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек, характеризующихся различным уровнем механических характеристик. Обнаружено, что микроструктура образцов, для которых характерно пониженное значение прочности и пластичности, содержит больше неметаллических включений, а также σ -фазы по границам аустенитного зерна. Изучена вязкость данных образцов в жидком состоянии. Вязкость измеряли методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов в диапазоне температур от 1500 до 1720 °С. По результатам измерений сделано заключение о связи механических свойств литых образцов стали 40X24H12CЛ с особенностями их микроструктуры, а также характером температурных и временных зависимостей кинематической вязкости расплава.

Ключевые слова: слиток, сталь, микроструктура, механические свойства, расплав, вязкость, дефекты, σ -фаза.

Известны результаты исследования связи структуры и свойств твердых и жидких сталей и сплавов, которые легли в основу разработки нового способа повышения качества металлопродукции [1 – 5]. Анализ температурных зависимостей структурно-чувствительных свойств жидких сталей и сплавов указывает на существование критических температур T^* , нагрев выше которых приводит к необратимому изменению их строения и условий кристаллизации металла. Значение T^* зависит от состава сплава, исходных материалов и условий производства на конкретном предприятии. Характер температурных и временных зависимостей структурно-чувствительных свойств расплава при нагреве свидетельствует об изменении его структурного состояния. Происходящие изменения связаны с уменьшением размеров микрочастиц различного химического состава и частичным их распадом. Гистерезис температурных зависимостей свойств жидкого металла, полученных при нагреве и охлаждении, свидетельствует о необратимости процессов, происходящих в расплаве при нагреве выше T^* . Структурное состояние расплава оказывает влияние на процесс кристаллизации: кристаллизация из более равновесного состояния протекает в более узком температурном интервале, что связано с уменьшением температурного интервала выделения первичной фазы. Нагрев расплава выше T^* существенно модифицирует структуру литого металла: уменьшается дендритный параметр, снижается

количество эвтектических карбидов, изменяется их морфология, наблюдается более однородное распределение структурных составляющих по объему слитка. Временная выдержка расплава при повышенных температурах также влияет на количество, размеры и морфологию избыточных фаз. Выплавка быстрорежущих сталей с использованием термовременной обработки (ТВО) расплава не только изменяет структуру, но и повышает горячую пластичность литого металла в процессе деформации. Улучшаются служебные свойства металла, так стойкость инструмента при точении возрастает на 20 – 40 %. Применение ТВО расплава при получении литых стальных изделий позволяет сформировать оптимальный комплекс структуры и служебных характеристик металла – увеличить количество вторичной γ' -фазы, повысить ее термостабильность, оптимизировать морфологию карбидов, повысить совершенство кристаллической структуры, увеличить на 30 – 50 % жаропрочность материала [3 – 4].

С практической точки зрения из всей совокупности работ, посвященных изучению связи строения и свойств твердых и жидких металлических сплавов, наиболее интересны те немногочисленные исследования, в которых устанавливается связь структурного состояния расплава и особенностей микроструктуры и механических свойств литого металла. Например в практике производства картера (сплав АЛ-4) и двухтрубного коллектора (сплав АЛ-9) мощных дизельных двигателей показано [6], что

ТВО расплава АЛ-4 сопровождается повышением пластичности отливки в 10 – 15 раз при одновременном росте прочности на 30 – 80 %. Для сплава АЛ-9 эффект перегрева выражен менее ярко, однако и в этом случае отмечается существенное повышение пластичности отливки при некотором снижении прочности [6].

Актуальный вопрос о связи микроструктуры литых образцов стали 40Х24Н12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек, характеризующихся различным уровнем механических характеристик, 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 механические характеристики готовых стальных изделий, однако не установлено зависимости механических свойств отливки от структуры литого металла, поэтому судить о природе связи механических характеристик и структуры твердого и жидкого металла затруднительно [3 – 4].

Авторы настоящей работы предлагают перспективный способ улучшения качества изделий колосников обжиговых тележек, изготавливаемых методом литья из стали 40Х24Н12СЛ – гомогенизирующую температурно-временную обработку расплава [2]. Этот способ позволяет получить металл с минимальным количеством дефектов микроструктуры и не требует высоких скоростей охлаждения [1 – 4]. 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^* . После такого перегрева расплав необратимо приближается к состоянию 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^* , 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^* указанный разброс необратимо уменьшался до значений, соответствующих случайной погрешности измерений.

Работа посвящена исследованию связи механических свойств литых образцов стали 40Х24Н12СЛ с особенностями их микроструктуры, а также характером температурных и временных зависимостей кинематической вязкости расплава. Авторы предлагают научно обоснованный режим температурно-временной обработки расплава, направленный на улучшение качества колосников обжиговых тележек, используемых в горнообогатительном производстве.

Исследованы температурные и временные зависимости вязкости $\nu(t)$ образцов жидкой стали 40Х24Н12СЛ с целью определения температур их гомогенизации T^* . Образцы стали, отобранные от колосников обжиговых тележек, характеризуются различным уровнем механических характеристик. Химический состав стали 40Х24Н12СЛ включает углерод (не более 0,04 %), кремний (0,5 – 1,5 %), никель (11 – 13 %), марганец (0,3 – 0,8 %), хром (22 – 26 %), фосфор (не более 0,03 %) и серу (не более 0,03 %).

В условиях ОАО «Уралмашзавод» традиционными методами проведены измерения механических свойств образцов стали 40Х24Н12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек. Результаты измерений представлены в таблице.

Изучение микроструктуры литых образцов проводили традиционными методами количественной и качественной металлографии [7 – 9]. Для изучения микроструктуры применяли оптический микроскоп

Механические свойства образцов стали 40Х24Н12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек

Номер партии образцов	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Твердость, НВ
1	332	574	16	249
2	290	385	9,0	194
3	345	445	3,2	174
4	240	410	14,5	171
5	265	460	14,5	186
Пределы допуска (ГОСТ 2176-77, литое состояние)	215–235	550–610	24–38	
Пределы допуска (производственные)	250	500	10	

Neophot-32, для идентификации структурных составляющих микротвердомер ПМТ-3 (нагрузка 50 г). Для идентификации неметаллических включений, которые просматривались только на нетравленных шлифах, использовали ГОСТ 1778-70. Макротвердость измеряли по двум отпечаткам на приборе «Бринель» при нагрузке 3000 кг шариком диаметром 10 мм.

Вязкость ν измеряли методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом в режиме нагрева и последующего охлаждения образца 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 поддержи-

вали 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 колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ. Во всех опытах использовали тигли из ВеО. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 10^5 Па.

Результаты металлографического исследования микроструктуры образцов стали 40Х24Н12СЛ представлены на рис. 1 – 3.

В микроструктуре образца из первой партии наблюдается большое количество мелких карбидов, имеют место и неметаллические включения. Преимущественно это оксикарбонитриды и карбонитриды в виде кристаллов правильной формы, одиночные сульфиды

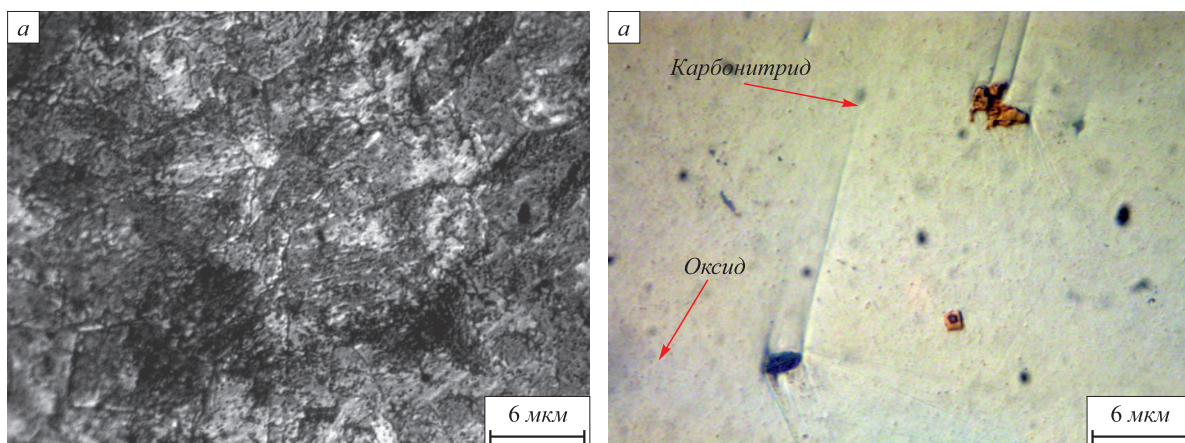


Рис. 1. Микроструктура отливки из первой партии

Fig. 1. Microstructure of the cast from the first batch

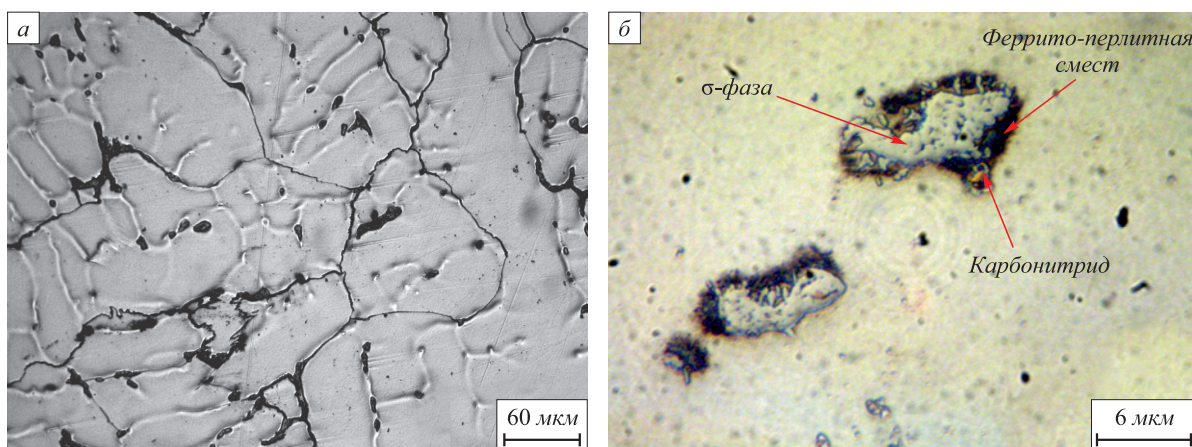


Рис. 2. Микроструктура слитка из второй партии

Fig. 2. Microstructure of the cast from the second batch

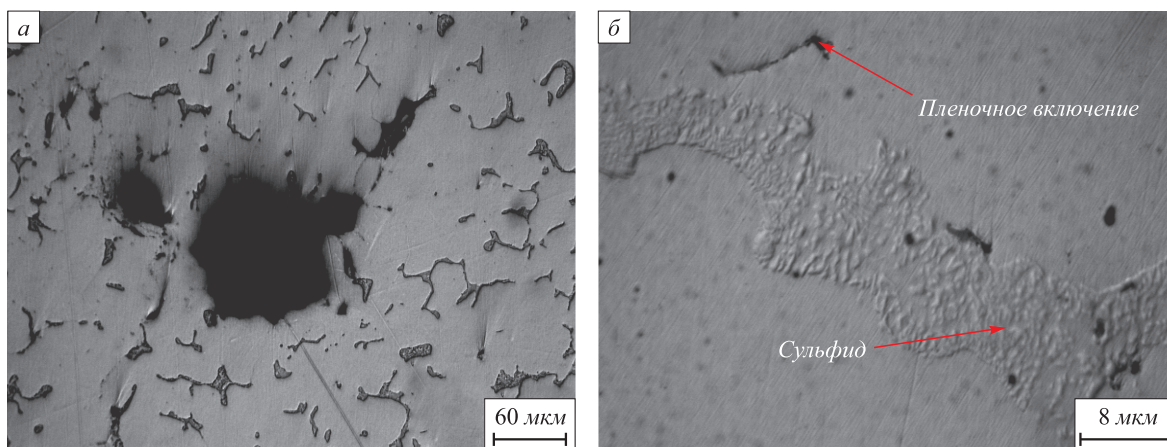


Рис. 3. Микроструктура слитка из четвертой партии

Fig. 3. Microstructure of the cast from the fourth batch

овалоподобной морфологии и оксиды (рис. 1). Микро- твердость основы составляет 2295 МПа.

Микроструктура образцов из второй партии характеризуется большим количеством неметаллических включений. Преимущественно наблюдаются скопления мелких оксидов, пленочные включения, одиночные сульфиды и карбонитриды. Пленочные включения могут провоцировать образование трещин. Микроструктура металла в основном состоит из аустенита (γ) с микротвердостью 2550 МПа. По границам зерен аустенита наблюдаются включения σ -фазы, мелкодисперсной феррито-перлитной смеси с микротвердостью ~ 3462 МПа, а также дисперсные карбиды хрома. Распад феррита на хрупкую σ -фазу и феррито-перлитную смесь может указывать на особенности охлаждения слитка. Для образца из третьей партии состав неметаллических включений и микроструктура полностью идентичны образцу из второй партии. В микроструктуре образца из пятой партии наряду с участками распавшегося феррита присутствует небольшое количество нераспавшегося высокотемпературного феррита. Отличие микроструктуры образца из четвертой партии в том, что встречаются дефекты усадочного происхождения и междендритная пористость (рис. 3).

Таким образом, можно отметить, что образец из первой партии имеет микроструктуру, отличную от образцов остальных партий. Структура образца из первой партии состоит из перлита разной степени дифференциации, карбидной фазы и мелкодисперсных карбидов хрома.

Структуры образцов остальных партий полностью идентичны, они состоят из зерен аустенита, незначительного количества высокотемпературного феррита и структур распавшегося феррита – хрупкой σ -фазы и феррито-карбидной структуры, которая экранирует последнюю. Присутствуют мелкодисперсные карбиды хрома. Основное отличие исследуемых литых образ-

цов – это разные объемные доли распавшегося феррита, что может определяться колебаниями химического состава даже в рамках ГОСТ 2176-77. Различие в объемной доле выделенных фаз, аустенита и распавшегося феррита сказывается на значении макротвердости (см. таблицу). Известно, что присутствие неметаллических включений пленочного типа, а также σ -фазы по границам аустенитного зерна является значительным охрупчивающим фактором.

Результаты вискозиметрического исследования образцов жидкой стали 40X24N12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек, характеризующихся различным уровнем механических характеристик, представлены на рис. 4. Для всех исследованных расплавов обнаружено переохлаждение металлической жидкости на 20 – 80 °С. Для образцов стали из четвертой и пятой партий, имеющих пониженный уровень механических свойств, зафиксировано расхождение политерм нагрева и охлаждения (гистерезис) – $T^* = 1630 - 1670$ °С. Для всех образцов при температуре 1670 °С, как в режиме нагрева, так и в режиме охлаждения, зафиксирован повышенный (в пределах 20 – 10 %) разброс значений кинематической вязкости. Релаксации значений вязкости к определенному среднему значению не наблюдается. Обращает внимание тот факт, что снижение абсолютных значений вязкости с ростом температуры расплава для образцов партий 2 – 5 (для них характерно пониженное значение прочности, см. таблицу) происходит интенсивнее в 2 раза. Все вышеперечисленные факты свидетельствуют о влиянии перегрева расплава на микронеоднородности наследственного характера, возникающие из-за присутствия неметаллических включений пленочного типа, а также σ -фазы и феррито-карбидной структуры в исходном слитке. Авторы считают, что для стали 40X24N12СЛ не всегда целесообразно повышать температуру нагрева расплава до 1670 – 1720 °С, т.е. применять гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости, для

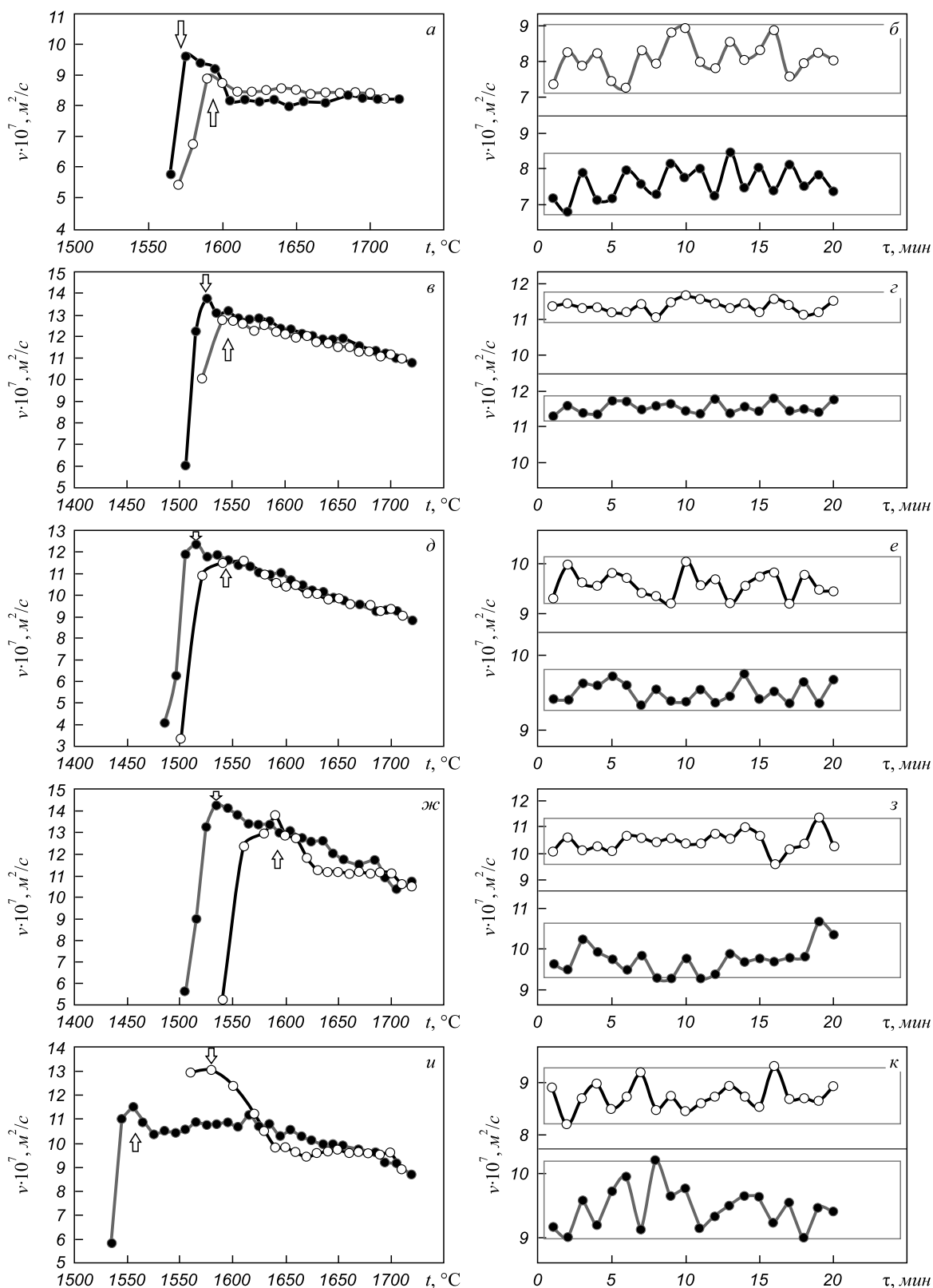


Рис. 4. Температурные и временные зависимости кинематической вязкости расплавов стали 40X24H12CJ, отобранных от колосников обжиговых тележек, характеризующихся различным уровнем механических характеристик: а, б – партия 1; в, з – партия 2; д, е – партия 3; ж, з – партия 4; и, κ – партия 5; ○ – нагрев; ● – охлаждение. Временные зависимости кинематической вязкости измерены при $T = 1670$ °C. Стрелки указывают значение температур ликвидуса

Fig. 4. Temperature and time dependence of the kinematic viscosity of the molten steel GX40CrNiSi25-12 selected from the grate kiln trucks, characterized by different levels of mechanical properties: а, б – batch 1; в, з – batch 2; д, е – batch 3; ж, з – batch 4; и, κ – batch 5; ○ – heating; ● – cooling. Time dependence of the kinematic viscosity measured at $T = 1670$ °C. The arrows indicate the value of the liquidus temperature

каждой партии образцов необходимо проводить предварительное вискозиметрическое исследование. Сталь 40X24N12СЛ является двухфазной сталью аустенитно-ферритного класса. Подобные стали отличаются значительной нестабильностью свойств – небольшие колебания в составе внутри марочного содержания элементов приводят к существенному изменению количественного соотношения γ и α -фаз и, следовательно, к различию в свойствах, в том числе и жидкой стали.

Полученные результаты можно качественно интерпретировать на основе представлений о микронеоднородном строении металлических расплавов [3–4]. Согласно этим представлениям, при плавлении многофазной стали 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, отмечаются нестабильность фиксируемых значений вязкости. Судя по ветвлению кривых $\nu(T)$ переход расплава в состояние истинного раствора происходит лишь вблизи точек этого ветвления. Температуру T^* , отвечающую переходу расплава в более однородное состояние, авторы определили по началу высокотемпературного совпадающего участка политерма нагрева и охлаждения. Для жидкой стали 40X24N12СЛ $T^* = 1630 - 1670$ °С (рис. 4). Согласно работе [1], после перегрева расплава выше T^* при последующем охлаждении могут существенно измениться условия кристаллизации металла и возможно значительное повышение уровня свойств литого металла.

Выводы. Проведено вискозиметрическое исследование образцов жидкой стали 40X24N12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек, характеризующихся различным уровнем механических свойств. По результатам измерений сделано заключение о связи механических свойств литых образцов стали 40X24N12СЛ с характером температурных и временных зависимостей кинематической вязкости расплава.

Выполнено металлографическое исследование микроструктуры образцов стали 40X24N12СЛ, отобранных от колосников обжиговых тележек. Обнаружено, что микроструктура образцов, для которых характерно пониженное значение прочности и пластичности, содержит больше неметаллических включений. Преимущественно наблюдаются скопления мелких оксидов, пленочные включения, одиночные сульфиды и карбонитриды, по границам зерен аустенита зафиксированы выделения σ -фазы и мелкой феррито-перлитной смеси. Присутствие неметаллических включений пленочного типа, а также σ -фазы по границам аусте-

нитного зерна является значительным охрупчивающим фактором. Твердость (НВ) образцов, для которых характерно пониженное значение прочности и пластичности, меньше на 30 %.

Для образцов из двух партий, имеющих пониженный уровень механических свойств, зафиксировано расхождение политерма нагрева и охлаждения (гистерезис) – $T^* = 1630 - 1670$ °С. Для всех образцов при температуре 1670 °С, как в режиме нагрева, так и в режиме охлаждения, зафиксирован повышенный (в пределах 20 – 10 %) разброс значений кинематической вязкости. Авторы считают, что для стали 40X24N12СЛ не всегда целесообразно повышать температуру нагрева расплава до T^* , т.е. применять гомогенизирующую термическую обработку металлической жидкости. Для каждой партии образцов необходимо проводить предварительное вискозиметрическое исследование, так как сталь 40X24N12СЛ отличается значительной нестабильностью свойств, в том числе и в жидком состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баум Б.А. Металлические жидкости. – М.: Наука, 1979. – 135 с.
2. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
3. Свойства металлических расплавов: Сборник / В.С. Цепелев, В.В. Конашков, Б.А. Баум и др. В 2-х частях Ч. 1 – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 358 с.
4. Свойства металлических расплавов: Сборник / В.С. Цепелев, В.В. Конашков, Б.А. Баум и др. В 2-х частях Ч. 2 – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 383 с.
5. Гельд П.В., Баум Б.А., Петрушевский М.С. Расплавы ферросплавного производства. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
6. Лыкасов Д.К., Чикова О.А. Оптимизация технологии легирования сплава 2124 марганцем на основе изучения связи структуры и свойств жидкого и литого металла. // Расплавы. 2009. № 1. С. 31 – 39.
7. Атлас дефектов стали: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
8. Металлография сплавов железа: Справ. изд. Пер. с нем. / Н. Лямбер, Т. Греди, Л. И Хабракен и др. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
9. Акшенцева А.П. Металлография коррозионно-стойких сталей и сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 286 с.
10. Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Кушнир 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; 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.

Поступила 4 декабря 2014 г.

CORRELATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF INGOTS OF STEEL GX40CrNiSi25-12 WITH THEIR MICROSTRUCTURE AND MELT VISCOSITY

Konashkov V.V.¹, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of “Research Center of Physics of Metallic Liquids of Institute of Materials and Metallurgy”*

Tsepelev V.S.¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of Physics of metallic liquids of the Institute of Materials and Metallurgy*

Chikova O.A.¹, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of “The Chair of physics”*

(chik63@mail.ru)

Belonosov A.V.², *Postgraduate*

¹ **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin** (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

² **Ural State Pedagogical University** (26, Kosmonavtov pr., Ekaterinburg, 620017, Russia)

Abstract. Metallographic examination of the microstructure of ingots of steel GX40CrNiSi25-12, which are characterized by different levels of mechanical properties, was held. Samples were selected from the grates of kiln carries. The microstructure of the samples, which are characterized by a lower value of strength and ductility, contains more non-metallic inclusions and σ -phase. The authors studied the viscosity of these samples in the liquid state. The viscosity of the liquid steel is measured by means of damping torsional oscillations of a crucible with melt in heating and subsequent cooling in the range of 1500 – 1720 °C. According to the results of the experiments the correlation of mechanical properties of cast samples of steel GX40CrNiSi25-12 was concluded with features of their microstructure and the kinematic viscosity of the melt.

Keywords: ingot, steel, microstructure, mechanical properties, melts, viscosity, defects, σ -phase.

REFERENCES

1. Baum B.A. *Metallicheskie zhidkosti* [Metallic fluids]. Moscow: Nauka. 1979. 135 p. (In Russ.).
2. Baum B.A., Khasin G.A., Tyagunov G.V. etc. *Zhidkaya stal'* [Liquid steel]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 208 p. (In Russ.).
3. Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E. *Svoistva metallicheskih rasplavov: Sbornik* [The properties of metallic melts: Collection of articles]. Part. 1. Ekaterinburg: UGTU-UPI. 2008. 358 p. (In Russ.).
4. Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E. *Svoistva metallicheskih rasplavov: Sbornik* [The properties of metallic melts: Collection of articles]. Part. 2. Ekaterinburg: UGTU-UPI. 2008. 383 p. (In Russ.).
5. Gel'd P.V., Baum B.A., Petrushevskii M.S. *Rasplavy ferrosplavnogo proizvodstva* [Melts of ferroalloy production]. Moscow: Metallurgiya. 1973, 288 p. (In Russ.).
6. Lykasov D.K., Chikova O.A. Optimization of alloying technology of alloy 2124 by manganese with studying the connection of structure and properties of liquid and molten metal. *Rasplavy*. 2009, no. 1, pp. 31–39. (In Russ.).
7. *Stahlfehlerfibel*. Vols. 1–2. Freiberg Stahlberatungsstelle. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, VEB, 1975. (Russ.ed. *Atlas defektov stali*. Moscow: Metallurgiya, 1979. 188 p.).
8. Lambert Nicole, Greday Tony, Habraken Louis etc. *De Ferri Metallographia*. Vol. 4. Düsseldorf, Verl. Stahleisen, 1983. (Russ.ed. Lambert N., Greday T., Habraken L. *Metallografija splavov zheleza: Sprav. Izd.* Moscow: Metallurgiya, 1985. 248 p.).
9. Akshentseva A.P. *Metallografija korrozionno-stoikikh staley i splavov. Spravochnik* [Metallography of corrosion-resistant steels and alloys. Directory]. Moscow: Metallurgiya, 1990. (In Russ.).
10. Tyagunov G.V., Tsepelev V.S., Kushnir M.N., Yakovlev G.N. Installation for measuring of kinematic viscosity of metal 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 metallicheskih rasplavov* [Non-contact measurement method of high viscosity of molten metal]. Patent RF no. 2386948. *Byulleten' izobretenii*, 2011, no. 11. (In Russ.).
12. Povodator A.M., Konashkov V.V., V'yukhin V.V., Tsepelev V.S. *Ustroistvo dlya issledovaniya vysokotemperaturnykh metallicheskih rasplavov* [Device for studies of high-temperature metal melts]. Patent RF no. 104721, *Byulleten' izobretenii*, 2011, no. 14A. (In Russ.).

Received December 4, 2014