



УДК 004.852

DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-564-570

Оригинальная статья
Original article

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПЛАВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА КАК ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ВТОРОГО РОДА

О. Б. Мильдер¹, Д. А. Тарасов¹, А. Г. Тягунов¹, В. С. Цепелев¹,
В. В. Вьюхин¹, А. Л. Левонян², О. В. Аношина³

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² Национальный политехнический университет Армении (Армения, 0009, Ереван, ул. Теряна, 105)

³ Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

anoshina@inbox.ru

Аннотация. Информация о поведении расплавы жаропрочных никелевых сплавов является основой для создания новых технологий плавки, позволяющих значительно повысить эксплуатационные свойства металлопродукции, а также решить ряд технологических задач. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о структурных изменениях, происходящих в расплавах различных металлов под влиянием температуры и времени. На протяжении многих лет ведется научная дискуссия о природе этих явлений, по ряду вопросов сформулировано общее мнение. Структурные изменения в металлических жидкостях представляются как фазовый переход второго рода, при котором жидкость большей плотности заменяется жидкостью меньшей плотности. Эти превращения в структурах жидких металлов называют переходом жидкость – жидкость (LLT). Исследования структурно-чувствительных свойств расплавы жаропрочных никелевых сплавов также выявляют структурные изменения, необратимо переводящие расплав в микрогетогенное состояние. Результаты исследований, представленные в данной работе, подтвердили, что структурные изменения в расплавах жаропрочных никелевых сплавов также являются фазовым переходом второго рода. Об этом свидетельствуют разрывы атомных микрогруппировок, равномерное перераспределение легирующих элементов и образование новых кластеров, характеризующихся меньшими размерами и большей химической однородностью. Поэтому данные изменения можно характеризовать как LLT, что не противоречит ранее обоснованной квазикристаллической модели микрогетогенного состояния жидких жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: расплав, никелевый сплав, структура, необратимое изменение, фазовый переход, температура, однородность

Для цитирования: Мильдер О.Б., Тарасов Д.А., Тягунов А.Г., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Левонян А.Л., Аношина О.В. Структурные изменения расплава жаропрочного никелевого сплава как фазовый переход второго рода. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023; 66(5):564–570. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-564-570>

STRUCTURAL CHANGES IN THE MELT OF A HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY AS PHASE TRANSITION OF THE SECOND ORDER

O. B. Mil'der¹, D. A. Tarasov¹, A. G. Tyagunov¹, V. S. Tsepelev¹,
V. V. V'yukhin¹, A. L. Levonyan², O. V. Anoshina³

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² National Polytechnic University of Armenia (105 Teryan Str., Yerevan 0009, Armenia)

³ Russian State Professional Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)

anoshina@inbox.ru

Abstract. Information about the behavior of melts of the high-temperature nickel alloys is the basis for creating new smelting technologies that significantly increase the service properties of metal products, as well as solve a number of technological problems. The results of numerous studies indicate structural changes occurring in various metal melts under the influence of temperature and time. For many years, there has been a scientific

discussion about the nature of these phenomena, and a common opinion was formulated on a number of issues. Structural changes in metallic liquids are presented as a second-order phase transition, where a liquid of higher density is replaced by a liquid of lower density. These transformations in the structures of liquid metals are called liquid-liquid transition (LLT). Studies of the structure-sensitive properties of melts of the heat-resistant nickel alloys also reveal structural changes that irreversibly transform the melt into a microhomogeneous state. The research results presented in this article confirmed that structural changes in melts of the high-temperature nickel alloys are also a second-order phase transition, as evidenced by the breakage of atomic microgroups, uniform redistribution of alloying elements, and the formation of new clusters characterized by smaller sizes and greater chemical homogeneity. Therefore, these changes can be characterized as LLT, while this does not contradict the previously substantiated quasi-crystalline model of the microinhomogeneous state of liquid heat-resistant nickel alloys.

Keywords: melt, nickel alloy, structure, irreversible change, phase transition, temperature, homogeneity

For citation: Mil'der O.B., Tarasov D.A., Tyagunov A.G., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V., Levonyan A.L., Anoshina O.V. Structural changes in the melt of a heat-resistant nickel alloy as phase transition of the second order. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):564–570.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-564-570>

ВВЕДЕНИЕ

Важный резерв повышения свойств металлопродукции заложен в подготовке расплава к кристаллизации, основанной на достижении жидким металлом равновесного состояния в широких интервалах температур. Возникновение неравновесного расплава немногим выше температуры ликвидуса объясняется наследием твердых структур и рассматривается с точки зрения квазикристаллической модели микроненормодного состояния как набор разноразмерных атомных микрогруппировок (кластеров) с неравномерным распределением легирующих элементов. С увеличением температуры нагрева расплава происходят структурные изменения, в результате чего расплав достигает равновесного микроненормодного состояния, которое сохраняется вплоть до кристаллизации. Результатом является получение благоприятных литых структур и существенное улучшение служебных свойств. Подобная термическая обработка расплавов имеет широкое промышленное применение и называется термовременной обработкой (ТВО) или высокотемпературной обработкой расплава (ВТОР) [1].

Многокомпонентные жаропрочные никелевые композиции применяются для изготовления наиболее ответственных деталей газотурбинных двигателей, предназначенных для работы в условиях повышенных температур и растягивающих напряжений. Химический состав включает до 22 легирующих элементов: С, Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, В, Fe, Y, Zr, Ta, Re, Ru, V, Се, La, Mn, Mg, Hf, Si, а также может содержать сложно удаляемые примеси S, Si, Р и растворенные газы O, N. На стадии металлургического производства возникает множество проблем: брак, низкий выход годного, сложность применения отходов. Применение ВТОР для жаропрочных никелевых сплавов позволило решить многие проблемы и повысить качество металлопродукции [2].

Разработка режимов ВТОР для жаропрочных никелевых сплавов основывается на детальном изучении структурных изменений расплавов при нагреве. Для описания этих превращений была предложена квазикристаллическая модель микроненормодного состоя-

ния для расплавов жаропрочных никелевых сплавов [1]: жидкие жаропрочные никелевые сплавы состоят из атомных микрогруппировок, имеющих стехиометрический состав, подобный основной упрочняющей γ' -фазе $Ni_3(Al, Ti)$. Нагрев металлической жидкости или длительная ее изотермическая выдержка способствуют переводу расплавов в гомогенное и микроненормодное состояние в широком температурном интервале. Это изменение необратимо и сохраняется до начала образования твердой структуры. Известно, что подобные структурные изменения для большинства исследованных металлических материалов являются фазовым переходом второго рода жидкость – жидкость (LLT) [3; 4]. По завершению процесса перестройки образуется стабильная металлическая жидкость, состоящая из однородных атомных микрогруппировок, имеющих меньший радиус, межатомные расстояния или измененное координационное число [3; 4].

Структурные изменения металлических расплавов жаропрочных никелевых сплавов подтверждаются многочисленными экспериментальными фактами [3–5]. Поскольку мнения о механизме этих изменений в сплавах на основе никеля пока остаются дискуссионными, то целью настоящей работы является определение принадлежности структурных изменений, происходящих при нагреве никелевых композиций, к фазовому переходу второго рода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве тестового материала выбран жаропрочный никелевый сплав ЖС6У, как наиболее часто применяемый в промышленности. Плавочный состав приведен в таблице.

Согласно феноменологической теории Ландау [6], фазовые переходы второго рода характеризуются непрерывностью изменения состояния и отсутствием выделения или поглощения скрытой энергии.

Основным методом определения наличия выделения или поглощения скрытой энергии процесса является дифференциальный термический анализ (ДТА). На рис. 1 приведены ДТА-кривые, полученные при нагреве (1) и охлаждении (2) сплава ЖС6У. Морфоло-

Плавоочный химический состав образца жаропрочного никелевого сплава ЖС6У, % (ат.)

Melting chemical composition of ZhS6U heat-resistant nickel alloy sample, at. %

C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	B	Fe	Zr	S	Si	Mn	P	Ni
0,18	9,0	9,8	1,5	10,3	5,4	2,6	1,0	0,025	0,5	0,04	0,015	0,5	0,5	0,015	осн.

гия кривых типична большинству марок жаропрочных никелевых сплавов.

Стрелками обозначены температуры солидуса t_s и ликвидуса t_l . В температурном интервале от 1250 до 1350 °С выявлены тепловые эффекты, связанные с плавлением (1) и кристаллизацией (2) исследуемого сплава. Выше температуры ликвидуса ДТА-кривые представляют собой горизонтальную линию с полным отсутствием поглощения или выделения тепла в широком температурном интервале. Результаты экспериментов свидетельствуют об отсутствии скрытой теплоты в процессе структурных изменений жидкого жаропрочного сплава.

Для выполнения поставленной задачи выбран метод удельного электросопротивления, как наиболее структурочувствительный для исследования структурных изменений расплавов жаропрочных никелевых сплавов [2]. Более подробно данная методика описана в работе [7]. Исследовались политермы $\rho = f(t)$ (рис. 2), а также изотермы $\rho = f(\tau)$ (рис. 3) исследуемого сплава.

Графики зависимости $\rho = f(t)$ нагрева и последующего охлаждения расплава ЖС6У имеют вид, характерный большинству жидких жаропрочных никелевых композиций [2; 5]. Политерма нагрева демонстрирует немонотонное изменение значений удельного электросопротивления. На ней имеются характерные точки, обозначенные как t_{an} и t_k , между которыми зафиксирован интервал с аномальным возрастанием удельного электросопротивления. Также к характерным особенностям политерм удельного электросопротивления жаропрочных никелевых сплавов относится явление гистерезиса, заключающееся в несовпадении ветвей нагрева и охлаждения.

Для выявления характера структурных изменений, происходящих в расплаве ЖС6У в диапазоне температур ниже t_k , выполнены измерения удельного электросопротивления в условиях изотермических выдержек при температурах 1417, 1448 и 1479 °С. Наблюдаемые значения электросопротивления фиксировались каждые 300 с (5 мин).

Как следует из результатов эксперимента, в период изотермических выдержек значения удельного электросопротивления постоянно возрастали, пока не достигали максимума (рис. 3), после которого слабо зависели от времени. Чем выше температура выдержки, тем меньше времени требовалось расплаву для достижения максимума.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характер зависимости $\rho = f(t)$ и положение точек t_{an} и t_k объясняются квазихимической моделью микронеоднородного состояния жаропрочных никелевых сплавов [1]: сразу же после плавления структура расплава ЖС6У гомогенна, но микронеоднородна. Она состоит из динамических кластерных образований с различными размерами и неравномерным распределением атомов элементов химического состава сплава. В результате повышения температуры достигается гомогенное и микрооднородное состояние с более равномерными размерами и составами атомных ассоциаций. Политермы охлаждения образцов, предварительно нагретых до температур, превышающих t_k , линейны, т. е. структурные изменения сохраняются при охлаждении в широком интервале температур и расплав перед затвердеванием находится в более равновесном состоянии.

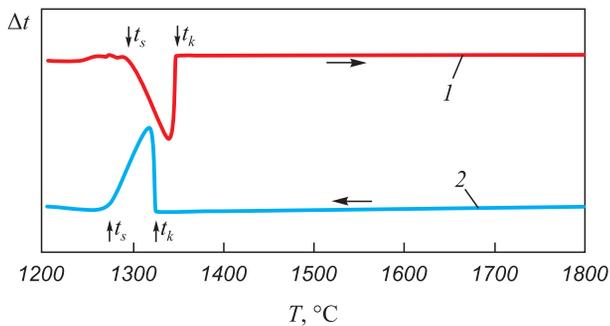


Рис. 1. ДТА кривые сплава ЖС6У: 1 – при нагреве; 2 – при охлаждении

Fig. 1. DTA curves of ZhS6U alloy: 1 – during heating; 2 – during cooling

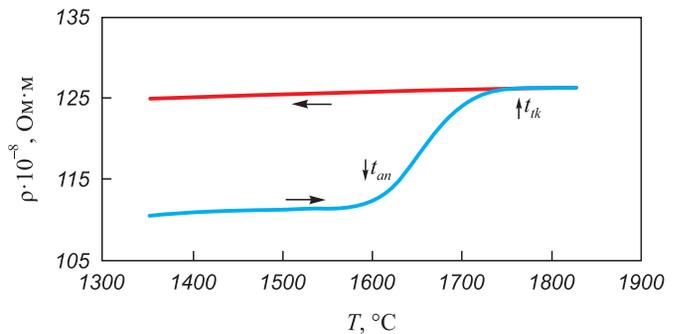


Рис. 2. Политермы удельного электросопротивления исследуемого сплава ЖС6У при нагреве и охлаждении

Fig. 2. Electrical resistivity polytherms of ZhS6U alloy during heating and cooling

В теории Друде предложена формула для электропроводности металлов

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau_m}{m}, \quad (1)$$

где n – концентрация всех электронов в единице объема (концентрация электронов проводимости в современных моделях); τ_m – среднее время свободного пробега.

Формула сохраняет свой формальный вид и в современных моделях, изменяется лишь физическое наполнение входящих в формулу величин [8]. Формально, единственным параметром, с которым можно связать нелинейное возрастание удельного электросопротивления, является среднее время свободного пробега. Нелинейное возрастание удельного электросопротивления (понижение электропроводности) объясняется увеличением количества центров рассеяния.

Явление гистерезиса физических свойств расплавов (рис. 2), заключающееся в несовпадении ветвей прямого и обратного хода, описывается многими другими исследователями [9 – 12], где также подчеркивается необратимость произошедших в расплаве изменений в широком интервале температур.

Из экспериментальных результатов, приведенных на рис. 3, следует, что постоянная времени сокращается по мере роста температуры, при которой осуществляется изотермическая выдержка, т. е. имеет место зависимость $\theta = f(t)$. При этом выявлена эмпирическая закономерность:

$$(t - t_{liq})\theta = \text{const}, \quad (2)$$

где t – температура изотермической выдержки; t_{liq} – точка ликвидуса.

Если формально устремить постоянную времени к нулю, можно оценить температуру, при которой подавляющее большинство кластеров будет разрушено,

т. е. температуру t_k перехода металлической жидкости в микрооднородное состояние.

Таким образом, структурные изменения металлической жидкости происходят не только в условиях нагрева до температуры t_k , но и в результате временных выдержек. Другими словами, процесс распада кластера происходит не только в условиях изменения термодинамических параметров системы (политерма), но также и в случае фиксации этих параметров (изотерма). Данный факт указывает на непрерывность происходящего процесса, что, как было отмечено, является одним из признаков фазового перехода второго рода.

Аналогичные результаты (релаксация в период длительных выдержек) были получены и другими исследователями [13 – 15].

Поскольку фазовый переход второго рода LLT имеет термодинамические и структурные признаки, то приведенное термодинамическое обоснование позволяет судить о механизме структурных изменений расплава ЖС6У. Сразу же после плавления расплав имеет микрооднородное состояние – кластеры с разным размером и неравномерным распределением химических элементов. Дальнейший нагрев и/или изотермическая выдержка приводят расплав к фазовому переходу второго рода LLT: металлическая жидкость с исходной структурой заменяется на подобную с меньшей плотностью, а именно происходит распад кластерных образований, равномерное перераспределение атомов и образование новых кластеров с меньшими размерами. Об увеличении количества атомных микрогруппировок также свидетельствует повышение значений удельного электросопротивления. Произшедшие структурные изменения необратимы, что подтверждается несовпадением политермы охлаждения с политермой нагрева. Новое структурное состояние отличается стабильностью и микрооднородностью, что подтверждается отсутствием экстремумов на политерме охлаждения.

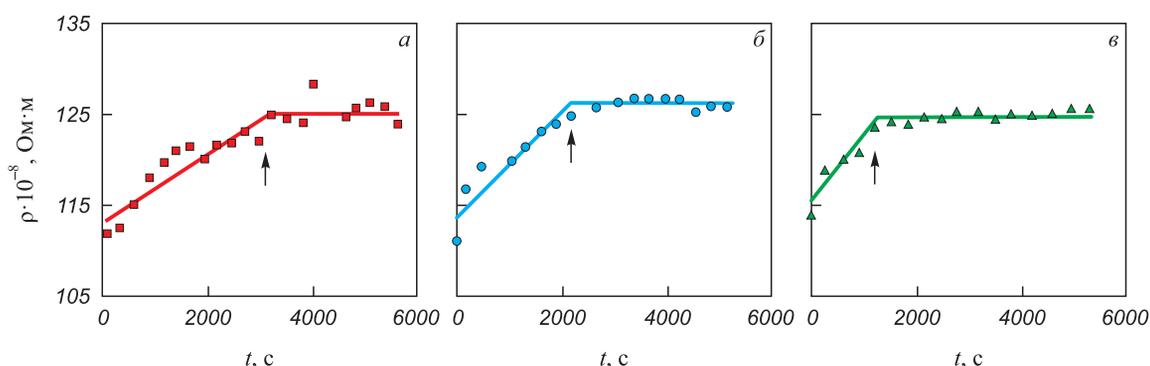


Рис. 3. Изотермы удельного электросопротивления расплава ЖС6У, полученные при температурах, °С: 1417 (а); 1448 (б); 1479 (в). Стрелками указано время завершения структурных изменений расплава

Fig. 3. Electrical resistivity isotherms of ZhS6U melt obtained at temperatures, °C: 1417 (a); 1448 (b); 1479 (c). Arrows indicate the time of completion of structural changes in the melt

С этими утверждениями согласны авторы работы [16]. По их мнению, признак микрооднородного состояния – это стабильность размеров кластеров в каждой фазовой области.

К подобным же выводам пришли авторы работ [17–20]. Кроме того, по их утверждениям с ростом температуры происходит резкое уменьшение параметра решетки и координационного числа, что также способствует повышению значений удельного электро-сопротивления.

Выводы

Показано, что расплав жаропрочного никелевого сплава ЖС6У при нагреве и в условиях изотермических выдержек испытывает структурные изменения, связанные с переходом в гомогенное микрооднородное состояние в широком интервале температур. Границы этих структурных изменений на политемах удельного электросопротивления расплава обозначены как t_{an} и t_k . Структурные изменения имеют необратимый характер.

Полученная экспериментально постоянная времени, описывающая процесс структурных изменений расплава на основе никеля в случае фиксированных термодинамических параметров системы (изотермическая выдержка), доказывает принадлежность структурного изменения расплава ЖС6У к фазовому переходу второго рода LLT.

Приведенные термодинамические доказательства структурных изменений расплава жаропрочного никелевого сплава позволяют расширить представление о его природе: термовременное воздействие на расплав жаропрочного никелевого сплава способствует так называемому преобразованию жидкость – жидкость (LLT). До LLT расплав состоит из кластеров с разными размерами и набором атомов. В период LLT происходит разрыв атомных микрогруппировок, равномерное перераспределение легирующих элементов и образование новых кластеров, характеризующихся меньшими размерами и большей химической однородностью.

Полученные утверждения не противоречат квазикристаллической теории микронеоднородного состояния металлических жидкостей и являются ее продолжением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баум Б.А. *Металлические жидкости*. Москва: Наука; 1979:120.
2. Ефимов В.Е. Влияние температурно-временной обработки интерметаллидных сплавов на основе Ni₃Al на их фазовый состав и жаропрочность. *Авиационные материалы и технологии. Выпуск «Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства»*. Москва: ВИАМ; 2003:79–92.
3. Николаев Б.В., Тягунов Г.В., Баум Б.А., Барышев Е.Е., Ларионов В.Н., Хлыстов В.Н., Булер Т.П., Печатников М.И. Влияние подготовки расплава на структуру и свойства интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al. *Металлы*. 1991;(1):104–110.
Nikolaev B.V., Tyagunov G.V., Baum B.A., Baryshev E.E., Larionov V.N., Khlystov V.N., Buler T.P., Pechatnikov M.I. Influence of melt preparation on structure and properties of Ni₃Al based intermetallic alloy. *Metally*. 1991;(1):104–110. (In Russ.).
4. Zu F.-Q. Temperature-induced liquid-liquid transition in metallic melts: A brief review on the new physical phenomenon. *Metals*. 2015;5(1):395–417.
<https://doi.org/10.3390/met5010395>
5. Бунтушкин В.П., Ефимов В.Е., Николаев В.В. Влияние микродобавок на критическую температуру расплава и жаропрочность литейного сплава на основе интерметаллида Ni₃Al. *Металлы*. 1995;(3):60–69.
Buntushkin V.P., Efimov V.E., Nikolaev V.V. Influence of microadditives on critical melt temperature and heat resistance of a casting alloy based on Ni₃Al intermetallic compound. *Metally*. 1995;(3):60–69. (In Russ.).
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Статистическая физика. Часть I*. Т. V. Москва: Наука; 1976:584.
7. Тягунов Г.В., Баум Б.А., Цепелев В.С., Тягунов А.Г. Измерение удельного электросопротивления методом вращающегося магнитного поля. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2003;69(2):35–37.
Tyagunov G.V., Baum B.A., Tsepelev V.S., Tyagunov A.G. Measurement of resistivity by the method of rotating magnetic field. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2003;69(2):35–37. (In Russ.).
8. Блейкмор Дж. *Физика твердого тела*. Москва: Мир; 1988:608.
Blakemore J.S. *Solid State Physics*. Cambridge University Press; 1985, 506.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139167871>
9. Цепелев В.С., Коначков В.В., Баум Б.А. *Свойства металлических расплавов. Часть 1*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2008:358.
10. Цепелев В.С., Коначков В.В., Баум Б.А. *Свойства металлических расплавов. Часть 2*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2008:383.
11. Ри Х., Ри Э.Х., Химухин С.Н., Ри В.Э., Зернова Т.С., Князев Г.А. Тепловые воздействия на структурообразование и свойства алюминиевых сплавов. *Вестник ТОГУ*. 2013;(2(29)):137–144.
Ri Kh., Ri E.Kh., Khimukhin S.N., Ri V.E., Zernova T.S., Knyazev G.A. Influence of thermal treatment on structure formation and properties of aluminum alloys. *Vestnik TOGU*. 2013;(2(29)):137–144. (In Russ.).
12. Li Y., Chen W., Dong B., Zhou S. Effects of metalloid content on viscosity of Fe-Si-B-P-C alloy melt. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;490:31–34.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2018.03.042>
13. Ладьянов В.И., Лагунов С.В., Пахомов С.В. Об осциллирующих релаксационных процессах в неравновесных металлических расплавах после плавления. *Металлы*. 1998;(5):20–23.

- Lad'yanov V.I., Lagunov S.V., Pakhomov S.V. On oscillating relaxation processes in nonequilibrium metal melts after melting. *Metally*. 1998;(5):20–23. (In Russ.).
14. Васин М.Г., Ладьянов В.И., Бовин В.П. О механизме немонотонных релаксационных процессов в металлических расплавах. *Металлы*. 2000;(5):27–32.
Vasin M.G., Lad'yanov V.I., Bovin V.P. On the mechanism of nonmonotonic relaxation processes in metal melts. *Metally*. 2000;(5):27–32. (In Russ.).
15. Колотухин Э.В., Тягунов Г.В., Николаев Б.В., Баум Б.А. О кинетическом режиме процесса релаксации структуры многокомпонентного металлического расплава. *ЖФК*. 1989;63(4):1118–1121.
Kolotukhin E.V., Tyagunov G.V., Nikolaev B.V., Baum B.A. On kinetic mode of relaxation of the structure of a multi-component metal melt. *Journal of Physical Chemistry*. 1989;63(4):1118–1121. (In Russ.).
16. Wang L., Bian X.F., Liu J.T. Discontinuous structural phase transition of liquid metal and alloys. *Physics Letters A*. 2004;326(5-6):429–435.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.04.052>
17. Боровых М.А., Чикова О.А., Цепелев В.С., Вьюхин В.В. О влиянии режима термообработки на удельное электро-
сопротивление расплава стали 35ХГФ. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2018;61(3):237–243. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-3-237-243>
Borovykh M.A., Chikova O.A., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V. Effect of heat treatment conditions on electrical resistivity of 35KhGF molten steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(3):237–243. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-3-237-243>
18. Popel P.S., Sidorov V.E. Microheterogeneity of liquid metallic solutions and its influence on the structure and properties of rapidly quenched alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 1997;226–228:237–244.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(96\)10624-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(96)10624-9)
19. Su H., Wang H., Zhang J., Guo M., Liu L., Fu H. Influence of melt superheating treatment on solidification characteristics and rupture life of a third-generation Ni-based single-crystal superalloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;49(4):1537–1546.
<https://doi.org/10.1007/s11663-018-1256-1>
20. Wang L.N., Sun X.F., Guan H.R. Effect of melt heat treatment on MC carbide formation in nickel-based superalloy K465. *Results in Physics*. 2017;7:2111–2117.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.06.020>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Олег Борисович Мильдер, к.ф.-м.н., доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0001-7828-032X
E-mail: o.b.milder@urfu.ru

Дмитрий Александрович Тарасов, к.т.н., доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0001-6911-8371
E-mail: d.a.tarasov@urfu.ru

Андрей Геннадиевич Тягунов, к.т.н., доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0001-8129-9726
E-mail: AG.Tyagunov@urfu.ru

Владимир Степанович Цепелев, д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0003-4195-9042
E-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru

Владимир Викторович Вьюхин, научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-0772-8155
E-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru

Айк Левонич Левонян, к.т.н., доцент, Национальный политехнический университет Армении
ORCID: 0009-0006-3003-8781
E-mail: hayk_levonyan@mail.ru

Ольга Владимировна Аношина, к.ф.-м.н., доцент, Российский государственный профессионально-педагогический университет
ORCID: 0000-0003-0563-8217
E-mail: anoshina@inbox.ru

Oleg B. Mil'der, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0001-7828-032X
E-mail: o.b.milder@urfu.ru

Dmitrii A. Tarasov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0001-6911-8371
E-mail: d.a.tarasov@urfu.ru

Andrei G. Tyagunov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0001-8129-9726
E-mail: AG.Tyagunov@urfu.ru

Vladimir S. Tsepelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0003-4195-9042
E-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru

Vladimir V. Vyukhin, Research Associate of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-0772-8155
E-mail: v.v.vyukhin@urfu.ru

Aik L. Levonyan, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., National Polytechnic University of Armenia
ORCID: 0009-0006-3003-8781
E-mail: hayk_levonyan@mail.ru

Ol'ga V. Anoshina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., Russian State Professional Pedagogical University
ORCID: 0000-0003-0563-8217
E-mail: anoshina@inbox.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

О. Б. Мильдер – разработка идеи, теоретическое обоснование, написание текста.

Д. А. Тарасов – разработка идеи, теоретическое обоснование, выполнение анализа.

А. Г. Тягунов – написание текста, проведение эксперимента, выполнение анализа.

В. С. Цепелев – разработка идеи, теоретическое обоснование.

В. В. Вьюхин – проведение эксперимента, выполнение анализа.

А. Л. Левонян – проведение эксперимента, теоретическое обоснование, выполнение анализа.

О. В. Аношина – написание текста, лабораторное сопровождение, редактирование.

O. B. Mil'der – development of the idea, theoretical justification, writing the text.

D. A. Tarasov – development of the idea, theoretical justification, analysis.

A. G. Tyagunov – writing the text, conducting an experiment, analysis.

V.S. Tsepelev – development of the idea, theoretical justification.

V. V. V'yukhin – conducting an experiment, analysis.

A. L. Levonyan – conducting an experiment, theoretical justification, analysis.

O. V. Anoshina – writing the text, laboratory support, editing.

Поступила в редакцию 12.04.2023

После доработки 24.08.2023

Принята к публикации 30.09.2023

Received 12.04.2023

Revised 24.08.2023

Accepted 30.09.2023