

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535-6:539.382:539.52

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

Поступила в редакцию / Received 24.06.2024

ГРНТИ 25.31.21+30.19.57+30.19.25

Специальность ВАК 1.3.8; 2.2.2

Принята к публикации / Accepted 28.08.2024

*Научная статья*

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ДЕФОРМАЦИИ СТРУКТУР НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ Х30Н60М9 И Х23Н65М13 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Михайлов Д. Л.<sup>1, 2</sup>, Ермишкин В. А.<sup>2</sup>, Минина Н. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия)

<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия)

**Аннотация** Исследована связь между кинетикой деформации и внутренними напряжениями образцов однофазных никелевых сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13, формирующимися в процессе деформации растяжением с одинаковой скоростью. Определено, что одним из показателей, определяющих и характеризующих структурное состояние, является показатель скорости деформационного упрочнения –  $\theta$  ( $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ ). С помощью фотометрических методов произведена оценка структурного состояния образцов. Результаты теоретической оценки, полученные фотометрическим способом, подтверждены экспериментом. Определено, что более стабильным является структурное состояние образца сплава Х30Н60М9.

**Ключевые слова:** яркость, тон, растяжение, коэффициент деформационного упрочнения, стабильность структуры, сплав Х30Н60М9, сплав Х23Н65М13

**Для цитирования:** Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А. Сравнительный анализ кинетики деформации структур никелевых сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13 по результатам испытаний на растяжение // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 436-452. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

*Research Article*

### COMPARATIVE ANALYSIS OF DEFORMATION KINETICS OF STRUCTURES OF NICKEL ALLOYS X30H60M9 AND X23H65M13 ACCORDING TO THE RESULTS OF TENSILE TESTS

Mikhailov D. L.<sup>1, 2</sup>, Ermishkin V. A.<sup>2</sup>, Minina N. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC "PROMDETAL" (Veliky Novgorod, Russia)

<sup>2</sup> A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

**Abstract** The relationship between the kinetics of deformation and internal stresses of samples of single-phase nickel alloys X30H60M9 and X23H65M13, formed during tensile deformation, has been studied. It has been established that one of the indicators that determines and characterizes the structural state is the indicator of the strain hardening coefficient –  $\theta$  ( $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ ). Using photometric methods, the structural state of the samples was assessed. It was determined by theory and confirmed by experiment that the structural state of the X30H60M9 alloy sample is more stable, for identical test conditions.

**Keywords:** *brightness, tone, stretching, strain hardening coefficient, structure stability, alloy X30N60M9, alloy X23N65M13*

**For citation:** Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A. Comparative analysis of deformation kinetics of structures of nickel alloys X30N60M9 and X23N65M13 according to the results of tensile tests // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 436-452. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).436-452

### Введение

Одним из основополагающих факторов кинетики деформации необратимого формоизменения кристаллических, металлических, материалов при внешнем воздействии, при механическом растяжении, является величина и распределение внутренних напряжений, возникающих в процессе деформирования и возможностями их релаксации.

Экспериментальные исследования деформации и внутренних напряжений образцов сплавов X30N60M9 и X23N65M13 были проведены при комнатной температуре и постоянной скорости. Скорость растяжения образцов составила  $v_p = 1$  мм/мин.

Цель работы – экспериментально подтвердить результаты, полученные фотометрическим способом, в различии кинетических характеристик деформирования образцов сравниваемых сплавов в условиях развития дислокационной структуры сплавов. Данные исследования необходимы по причине того, что сравниваемые сплавы являются перспективными, конструкционными материалами и предназначены для химических реакторов на переделах минерального сырья в условиях нагрева до 650°C. На основании этого сплавы должны быть прочными, деформируемыми и свариваемыми. Для чего определим различие в стабильности структур к механическому нагружению. Известно, что именно кинетика накопления микротрещин определяет долговечность материала сплава. Кинетическое учение академика Журкова С. Н. утверждает [1], что в классической области температур, когда тепловые колебания починаются статистике Больцмана, элементарными актами процессов, ведущих к разрушению твердого тела, являются разрывы напряженных межатомных связей, локальными флуктуациями энергии.

В ходе выполнения работы экспериментально необходимо подтвердить, что всякое изменение формы отдельного зерна как кристалла, входящего в некоторую систему, требует какого-то количества независимых систем скольжения. Соответственно, можем допустить некоторую комбинацию систем скольжения (далее КСС) которая обеспечивает долговечность материала. Когда КСС имеет большую степень свободы, в этом случае будет разрешена меньшая скорость деформационного сдвига, соответственно, большая скорость убывания деформационного упрочнения –  $\theta$ .

### Исследуемые материалы и методы исследования

В настоящей работе исследовались образцы коррозионностойких металлических материалов – никелевых композиций, сплавов Х30Н60М9 [2], Х23Н65М13, структуры обоих зафиксированы в однофазном состоянии, ГЦК-решетка, закалкой, закалочные мероприятия проведены при температурах 1107°С и 1135 °С, соответственно. Охлаждение образцов произведено погружением в воду,  $T_{\text{воды}} = 23^{\circ}\text{C}$ , балл зерна для структур обоих сплавов составил №2-3. Данные о химическом составе образцов исследованных сплавов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химические составы сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13

№ обр.	Элементный состав, мас. %											
	Ni	Cr	Mo	Al	Fe	Mn	C	La	Nb	Si	S	P
1	Осн.	29,6	8,75	0,21	0,01	0,003	0,006	0,002	0,00	0,018	0,0025	0,0074
2	Осн.	23,21	12,78	0,11	0,47	0,03	0,005	0,00	0,03	0,06	0,003	0,004

Сплав №1 – сплав Х30Н60М9 (шифр «Раствор-Н», изготовитель: ФГУП «ВИАМ», г. Москва).

Сплав №2 – сплав Х23Н65М13 (в марке ХН62М, изготовитель: АО «МЗ Электросталь», г. Электросталь).

### Теоретические данные

Более оптимальное структурное состояние образца сплава Х30Н60М9, после проведенной общей деформации растяжением, засвидетельствовал разработанный фотометрический метод оценки структурного состояния твердого тела [3].

Для цветных изображений эталонов образцов (образцов до деформации, индекс «0») и рабочих частей – «шеек» (образцов после деформации, индекс «1»), (рисунок 1), были применены вычислительные процедуры, с помощью которых были рассчитаны нормированные показатели отраженных плотностей тонов и яркостей в спектральных группах, соответственно – Q и L, светового потока от поверхности образца, в интервале [0, 1], где 0 – полное поглощение образцом светового потока, 1 – полное отражение. Расчет был произведен для равнозначных размером изображений, 72х242 пкс., в графическом формате .jerg. Были оценены поверхности образцов с чистотой не менее 0,8 мкм.



Рисунок 1. Изображение сравниваемых образцов сплавов, в графическом формате .jpeg. Поз.1, Поз.2 – «шейки».

Далее в работе был введен безразмерный фотометрический параметр оценки –  $\Psi$  структурного состояния поверхностей как частное текущих показателей тона и яркости.

$$\Psi_i = Q_i / L_i, \quad (1)$$

где Q и L – показатели отраженных плотностей тона и яркости в спектральных группах, соответственно. Индекс – i : 0 – изображение образцов до деформации, 1 – после деформации (таблица 2).

Таблица 2. Показатели яркости (Li) и тона (Qi) отраженного видимого света в цветовой спектральной группе для образцов X30H60M9 и X23H65M13

№ обр.	Сплав	L <sub>0</sub>	Q <sub>0</sub>	$\Psi_0$	L <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	$\Psi_1$
1	X30H60M9	0,5230	0,4986	0,9534	0,5232	0,4340	0,8295
2	X23H65M13	0,5914	0,4454	0,7532	0,6035	0,3323	0,5006

Спектр яркости отражения от поверхности материала формируется в результате отражения фотонов видимого света на электронах. Любые химические (атомы легирующих и примесных элементов и их скопления, выделения фазовых составляющих) или физические (дефекты кристаллической решетки, границы зерен, субзерен) неоднородности материалов меняют плотность электронных состояний [4]. Поэтому различие в результатах отраженного, для одинаковых условий эксперимента, свидетельствует о различиях электронных состояний для отражаемых металлических поверхностей. Следовательно, можем заключить о различиях в структурных состояниях основной фазы, которая в нашем исходном случае является однофазной.

Кинетика фотометрического показателя (таблица 2, рисунок 2) для сравниваемых сплавов была определена как

$$d\Psi_i = d(Q_i / L_i) / d\varepsilon_i, \quad (2)$$

где Q<sub>i</sub>, L<sub>i</sub>,  $\varepsilon_i$  – соответственно, плотность тона, плотность яркости, деформация

Анализируя зависимости на рисунке 2, необходимо отметить о различии в кинетике зависимостей 1 и 2 образцов сплавов. Установлено, что зависимости являются убывающими, скорость убывания для зависимости 2 выше. Установленный факт позволяет заключить о различном изменении излучательной способности образца 2 для видимого света, о большем количестве рассеянного, соответственно, о различной стабильности структурных состояний, структур твердого раствора для сравниваемых сплавов, относя более качественное состояние, соответственно, лучшее сопротивление деформации (прочность) в пользу структуры сплава Х30Н60М9.

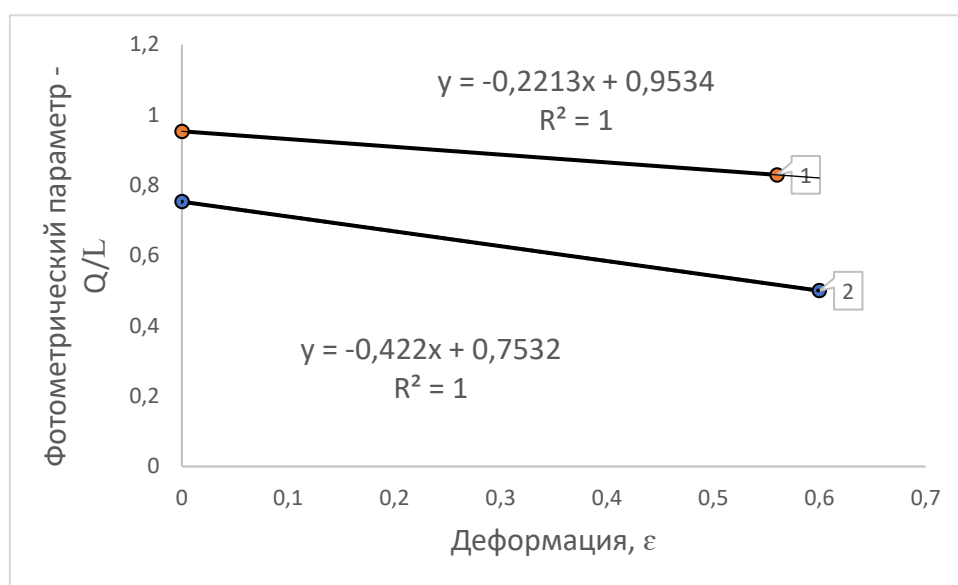


Рисунок 2. Изменение фотометрического показателя в интервале общей деформации образцов сплавов Х30Н60М9, кривая 1 – Х23Н65М13, кривая 2 – данные таблицы 2

Подтверждая вышеобозначенное, также необходимо привести данные, полученные расчетом тонов для сравниваемых образцов, сравнивая рисунки 3 и 4, можем установить, что плотность тона для состояния образца 1 выше, что характеризует структурное состояние с большей степенью организации.

### Экспериментальные данные

Основным инструментом оценки стабильности параметров механических свойств металлических материалов сплавов, их поведения, является построение диаграммы деформирования. Диаграмма деформирования строится в результате стандартного эксперимента на растяжение образца, который в нашем случае был плоским.

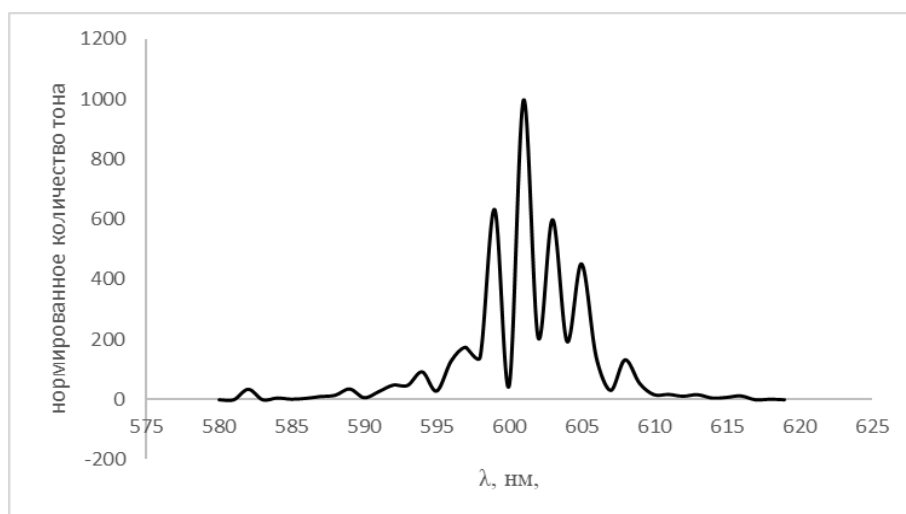


Рисунок 3. Сплав Х30Н60М9. Зависимость нормированного количества тона в спектральной цветовой группе, для «шейки». Количество тона на пиксел в спектральной группе – 0,4340

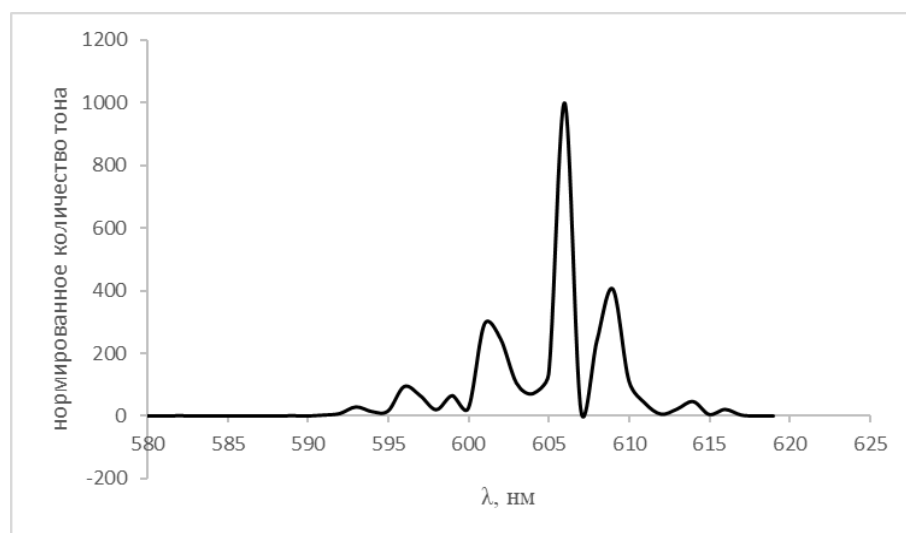


Рисунок 4. Сплав Х23Н65М13. Зависимость нормированного количества тона в спектральной цветовой группе, для «шейки». Количество тона на пиксел в спектральной группе – 0,3323

В работе испытания образцов на растяжение были проведены с помощью разрывной машины ИНСТРОН (усилие 10 тн.) в соответствии с требованиями отечественного стандарта [5]. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение плоских образцов сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13,  $v_{\text{растяжение}} = 1 \text{ мм/мин.}$ , RT (комнатная температура)

	Отн. удл.	Предел текучести (МПа)	Предел прочности (МПа)	Нагрузка (kgf)	Длина (mm)	Толщина (mm)	Ширина (mm)	Примечание
1	66,10	334	768	4569	50,00	5,750	10,15	Х30Н60М9
2	75,63	339	735	4686	50,00	6,040	10,35	Х23Н65М13

По результатам эксперимента на растяжение была построена условная диаграмма деформирования, представляющая собой связь между напряжениями  $\sigma$  и деформациями  $\varepsilon$  (рисунки 5, 6). Формулы для расчета представлены ниже:

$$\sigma = P / S_0, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \Delta l / l_0, \quad (4)$$

где  $P$  – осевая нагрузка (деформирующее усилие),  $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца,  $l_0$  – начальная расчетная длина образца,  $\Delta l$  – абсолютное удлинение образца.

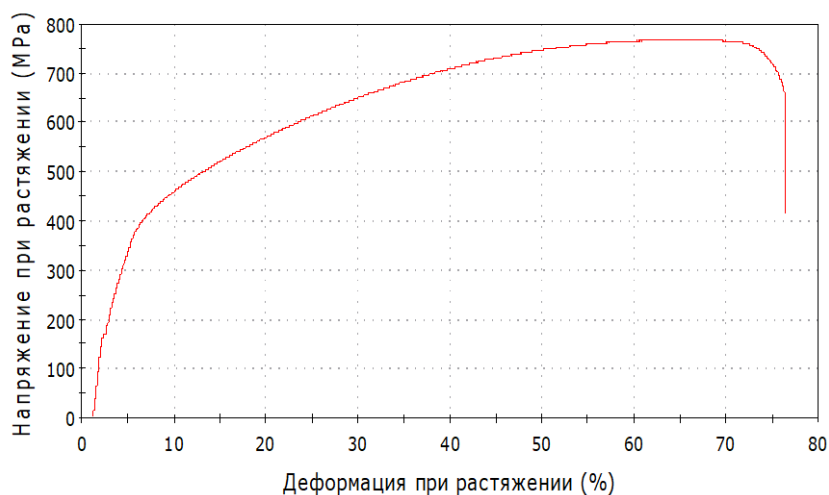


Рисунок 5. Образец 1, сплав X30H60M9

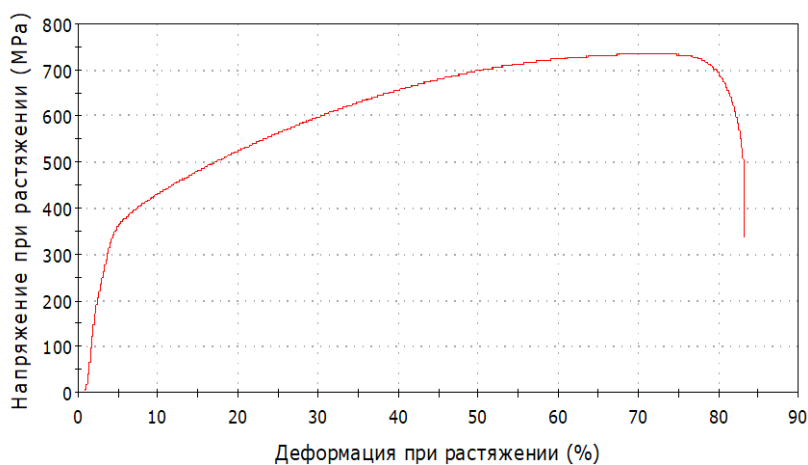


Рисунок 6. Образец 2, сплав X23H65M13

На рисунках 5 и 6 представлены условные кривые упрочнения, которые были получены в результате эксперимента. Существенным недостатком стандартной методики является невозможность учесть процесс разупрочнения, который в обязательном порядке сопровождает процесс упрочнения. С физической точки зрения необходимо понимания напряжения с учетом изменения площади поперечного сечения образца, в этом случае оно будет объективным – истинным, соответственно, необходимо понимание предела текучести для каждого значения степени деформации.

Очевидно, что истинные напряжения вследствие образования шейки растут до разрушения образца. Следует отметить, что условные и истинные кривые деформирования начинают расходиться еще до образования шейки, вследствие утонения образца.

Значение деформации  $\varepsilon_b$ , соответствующее моменту начала образования шейки, необходимо для корректного построения расчётной условной кривой деформирования, так как основные используемые для расчётов прочности программные комплексы не допускают ввод участка кривой деформирования, соответствующего этапу развития шейки. Использование вместо  $\varepsilon_b$  относительного удлинения ( $\delta$ ) некорректно ввиду различий их величин. Стоит отметить и то, что  $\varepsilon_b$  по сравнению с  $\delta$  является более стабильной характеристикой [6].

Для повышения точности описания поведения структур сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13 необходимо провести дополнительные исследования. Применим истинные кривые деформирования. Для построения которых необходимо знать, в том числе, величину напряжения, соответствующую моменту разрушения –  $\sigma_{разр}$ .

При проведении испытаний на растяжение не фиксируется значение деформации  $\varepsilon_b$ , соответствующее моменту начала образования шейки. Это обусловлено как тем, что в ГОСТ на проведение испытания на растяжение, определение этой величины не регламентировано.

Условная диаграмма деформирования недостаточно точно представляет свойства материала, так как не учитывается изменение площади сечения в процессе испытания и образование шейки. До образования шейки, то есть максимума на условной диаграмме деформирования, для определения истинных напряжений  $\sigma_{ис}$  и деформаций  $\varepsilon_{ис}$  пользуются следующими соотношениями:

$$\sigma_{ис} = \sigma_{усл} (1 + \varepsilon_{ис}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ис} = \ln(1 + \varepsilon_{усл}). \quad (6)$$

Для сравнительного анализа, были рассчитаны зависимости, где за исходные данные были взяты результаты испытания на растяжение, в интервале деформации. Для обоих сплавов были обработаны массивы данных и построены диаграммы в



истинных значениях деформаций и напряжений структурных состояний сплавов. Зависимости определены из расчета 30 тыс. точек исходных данных для каждого образца. Отметим, что на рисунках 5 и 6 показаны условные машинные кривые растяжения исследуемых образцов. Видно, что деформационное упрочнение материалов образцов сплавов протекает похожим образом. Прочностные характеристики также схожи.

Геометрическая форма кривых на рисунках 5 и 6 – параболическая, подсказывает класс функций, дающих их математическое описание в координатах « $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$ ». Из сопоставления рисунков 5 и 6 для условных значений и рисунков 7 и 8 для истинных значений в координатах « $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$ » в наглядной форме видны преимущества в представлении результатов испытаний на растяжение.

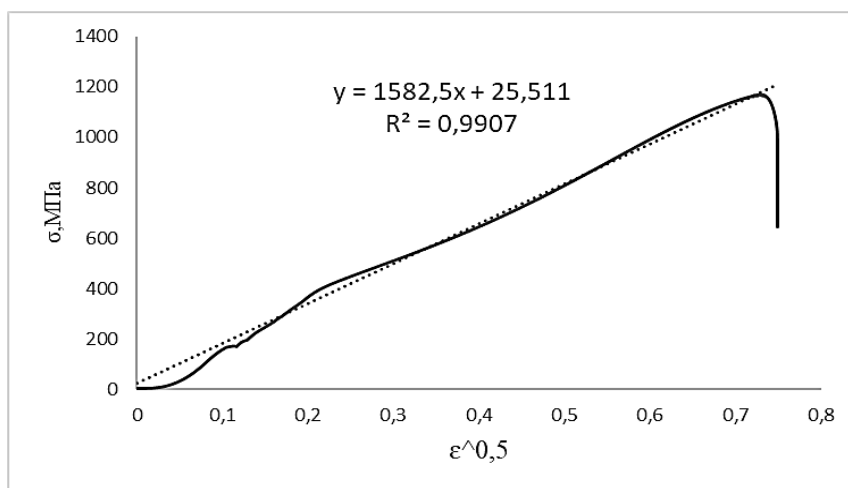


Рисунок 7. Сплав X30H60M9. Диаграмма деформирования в осях  $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$ , в интервале общей деформации. Кривая характеризует деформационное упрочнение структуры образца,  $x_i = \epsilon_i^{0,5}$

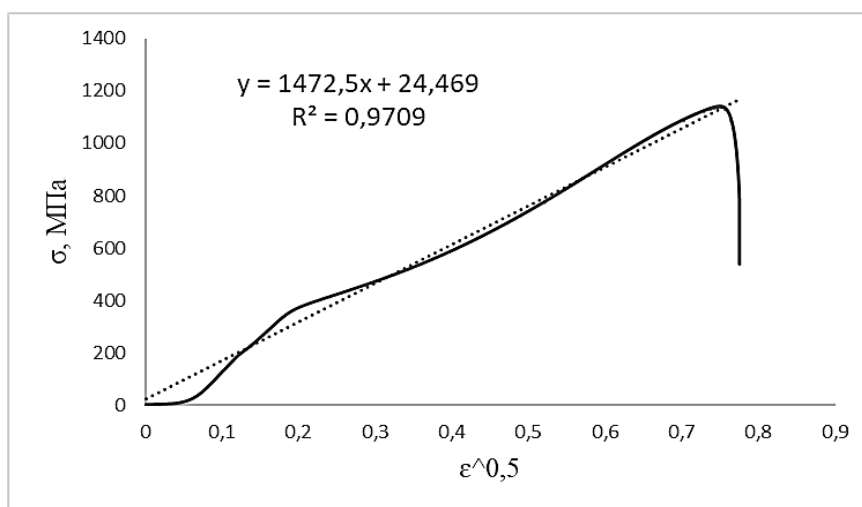


Рисунок 8. Сплав X23H65M13. Диаграмма деформационного упрочнения,  $\sigma_i - \epsilon_i^{0,5}$ , в интервале общей деформации. Кривая характеризует деформационное упрочнение структуры образца,  $x_i = (\epsilon_i)^{0,5}$

Выполнив дифференциальное исчисление аппроксимирующей функции (рисунок 7), имеем:  $y' = f(\epsilon_i) d\epsilon$ ,  $y' = 1582,5 / 2 (\epsilon_i^{-0,5})$ . Графический зависимость представлена на рисунке 9.

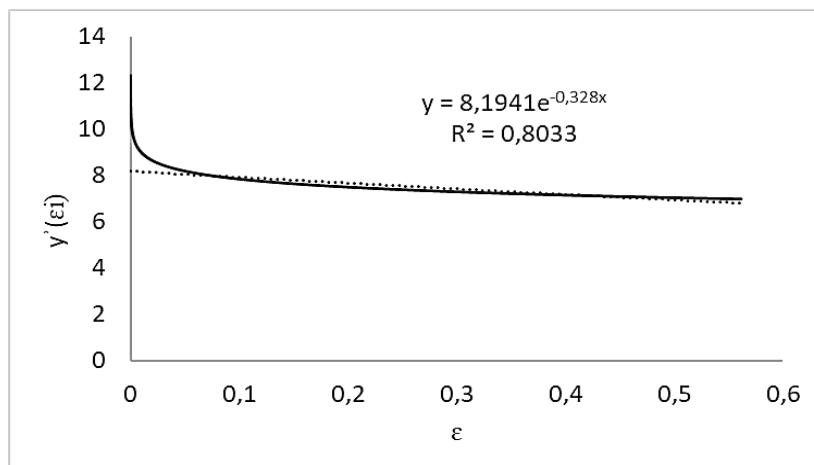


Рисунок 9. Сплав X30H60M9. Дифференциальная кривая функции упрочнения. Ось ординат в логарифмических координатах. Описан интервал общей деформации

Анализируя рисунок 9, очевидно, что функция является убывающей, показатель скорости затухания деформационного упрочнения для аппроксимирующей функции образца сплава X30H60M9  $\theta_1 = -0,328$ , функция является убывающей. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,8033$ , обеспечивает высокий показатель коэффициента корреляции, не менее 0,85.

Выполнив дифференциальное исчисление аппроксимирующей функции (данные на рисунке 8), имеем:  $y' = f(\epsilon_i) d\epsilon$ ,  $y' = 1472,5 / 2 (\epsilon_i^{-0,5})$ . Графически зависимость представлена на рисунке 10.

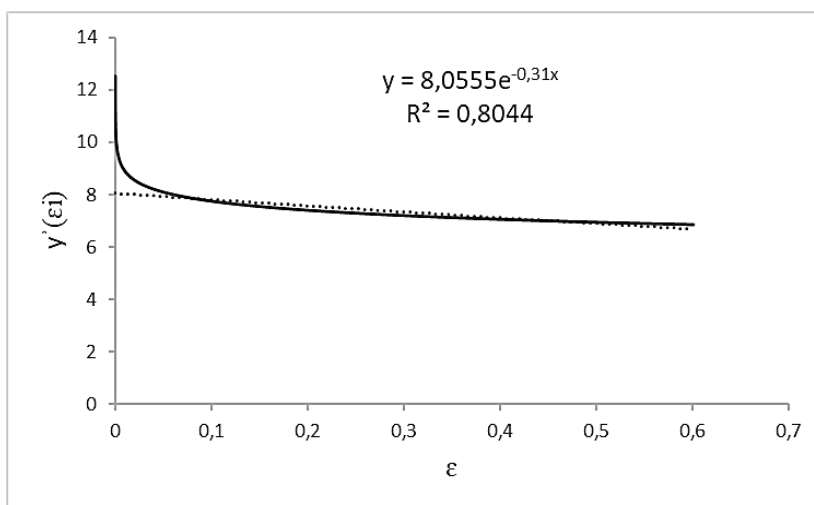


Рисунок 10. Сплав X23H65M13. Дифференциальная кривая функции упрочнения. Ось ординат в логарифмических координатах. Описан интервал общей деформации

Как показано на рисунке 10, показатель скорости затухания деформационного упрочнения образца сплава Х23Н65М13  $\theta_2 = -0,31$ , функция является убывающей. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,8044$ , обеспечивает высокий показатель коэффициента корреляции, не менее 0,85.

Необходимо отметить, что, анализируя полученные данные (рисунки 7 и 8), был сделан вывод, который поставил под сомнение результаты, полученные с помощью условных диаграмм деформации. Рассчитанные истинные диаграммы свидетельствуют о корректировке в оценке пластичности образца сплава Х30Н60М9, вкупе с прочностными характеристиками и определением стабильного структурного состояния в пользу образца сплава Х30Н60М9.

На основании полученных экспериментальных данных, полученных при растяжении, т. е. при производстве деформации, в идентичных условиях, когда скорость растяжения постоянна, было определено, что скорости убывания деформационного упрочнения (или коэффициентов деформационного упрочнения - КДУ) для структур сплавов Х30Н60М9 и Х23Н65М13 различны (рисунки 9 и 10 соответственно). Для сплава Х30Н60М9 скорость убывания выше. Скорости были определены как показатели экспоненциальной зависимости для остатка (предэкспоненциальный множитель) аппроксимирующей функции ( $|-0,328| > |-0,31|$ ).

По результатам расчетов можем заключить, что чем выше скорость убывания деформации, тем более термодинамически устойчивой остается структура образца. В рассматриваемом случае ею является структура материала сплава Х30Н60М9.

Используя знания классической механики, необходимо заключить, что время разрушения образца Х30Н60М9 будет более продолжительным для одинаковых условий испытания образцов. Следовательно, можно утверждать о различии энергосостояний межатомных связей, о более равновесной структуре образца Х30Н60М9.

По данным АО «ЧМЗ», г. Глазов относительное удлинение образцов листового проката сплава «Раствор-Н», содержание С < 0,1 мас. %, из-ль ФГУП ВИАМ, в состоянии поставки, до испытаний, составило 58%, соответственно,  $\sigma = 740$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 375$  МПа. После выдержки при температуре 550°C в течение 550 часов относительное удлинение для образца сплава «Раствор-Н» (Х30Н60М9) составило 53%, соответственно,  $\sigma = 1010$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 580$  МПа [7]. Соответственно, изменение показателя относительного удлинения –  $\delta$ , в логарифмических координатах составило – 9%.

По данным АО «НИИ химмаш» г. Москва [8], относительное удлинение образцов листового проката сплава ХН62М (сплав Х23Н65М13), опытная плавка РИ51149 (С = 0,005 мас. %), сертификат №5-67822, АО «МЗ «Электросталь» в состоянии поставки, до испытаний, составило 71%, соответственно,  $\sigma = 719$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 336$  МПа. После выдержки при температуре 550°C в течение 450 часов относительное удлинение составило 44,4%, соответственно,  $\sigma = 1145,5$  МПа,  $\sigma_{0,2} =$

570 Мпа. Установлено, что изменение показателя относительного удлинения –  $\delta$ , по шкале натурального логарифма составило – 46,9%.

Таким образом различие в пластичности сплавов после длительной высокотемпературной выдержки свидетельствует о различной восприимчивости структур образцов сплавов к превращению в идентичных условиях нагружения, о различии структурных состояний.

Из литературных источников [9, 10] известно, что различие в коэффициентах деформационного упрочнения структур твердых растворов сплавов устанавливает различие в показателях энергии дефекта упаковки (ЭДУ) сплавов. Следовательно, в нашем случае (рисунки 7 и 8), можем заключить о различии в ЭДУ –  $\gamma$ , рассматриваемых сплавов, эти показатели пропорциональны [11].

### Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований установлено, что релаксация напряженного состояния при производстве общей деформации растяжением происходит посредством развития дислокационной структуры и отдельных двойников (рисунки 11, 12).

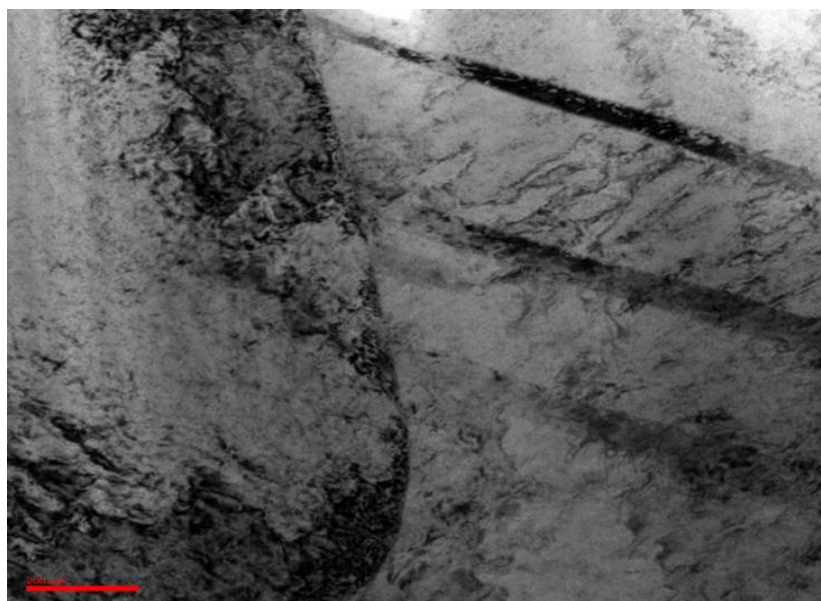


Рисунок 11. Сплав X23H65M13. Изображение дислокационной структуры и двойников, x15000

Полученные изображения могут быть прокомментированы следующими размышлениями.

Известно, что деформация преимущественно происходит скольжением по направлениям и плоскостям с плотным участием атомов, и дислокационного механизма, где инструментами является:

- диффузионное скольжение краевых дислокаций,
- диффузионное переползание винтовых дислокаций.

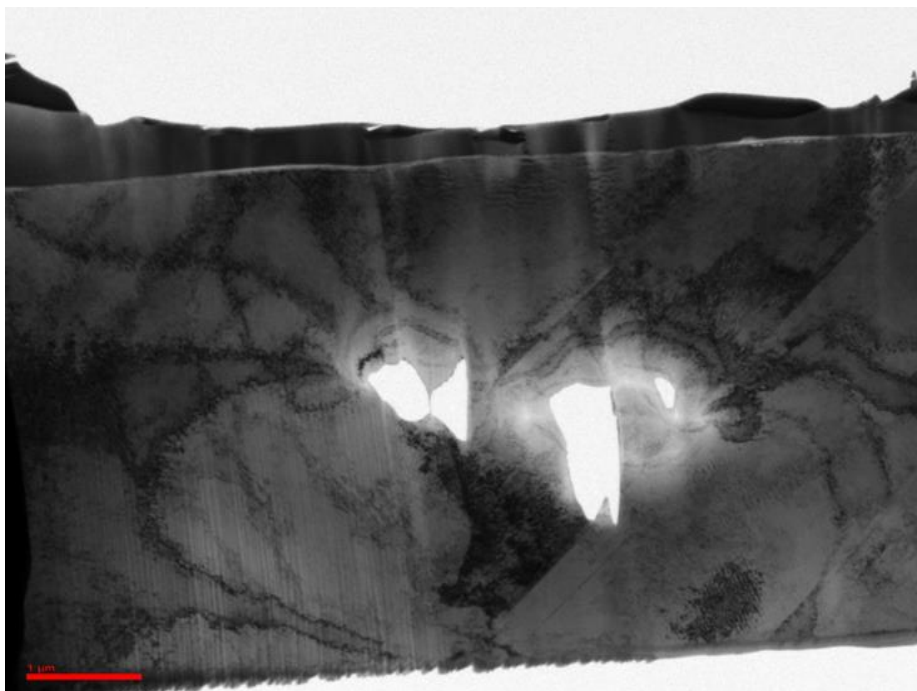


Рисунок 12. Сплав X30H60M19. Изображение дислокационной структуры и отдельных двойников, x2550

Это происходит по причине того, что в процессе деформации резко увеличивается концентрация точечных дефектов (вакансий). Это приводит к ускорению диффузионных процессов. Если эти механизмы не обеспечивают минимального энергосостояния структуры, в этом случае можем ожидать развития деформации структуры двойникованием, где деформация будет локализована на двойниковых границах.

1. Известно, что превращение дислокационной структуры включает в себя скольжение в плоскости сдвига, переползание краевых компонент в соседние плоскости и поперечное скольжение винтовых компонент. Скорость всего регулируется возможностью притока вакансий к дислокациям или возникновением новых вакансий на дислокациях. Легче всего вакансии присоединяются к дислокациям на ступеньках. Поэтому большая концентрация ступенек на дислокациях облегчает процесс перестройки дислокационной структуры. Появление вакансий – это процесс, активируемый внесенной энергией. Скорость превращения  $V_p$  можно определить следующим выражением:

$$V_p \sim \exp(-E_p/kT), \quad (7)$$

где  $E_p = E_j + E_f + E_m$  – энергия активации процесса перестройки дислокационной структуры. В последнем выражении  $E_j$  – энергия активации образования ступеньки,  $E_f$  – энергия активации образования вакансии,  $E_m$  – энергия

активации миграции вакансий. Сумма  $E_f + E_m$  равна энергии активации самодиффузии.

2. На рисунках 9 и 10 приведены показатели скоростей (коэффициенты) деформационного упрочнения –  $\theta$  ( $\theta_1 > \theta_2$ ). Данные были получены расчетным способом по экспериментальным результатам растяжения образцов в одинаковых условиях испытаний. Соответственно, можем заключить о соответствии для ЭДУ сплавов -  $\gamma$ . Таким образом  $\gamma_{X30H60M9} > \gamma_{X23H65M13}$ .

3. Известно, что определяющую роль играет энергия активации образования ступеньки  $E_j$  (5). Известно, что величина  $E_j$  связана с энергией дефекта упаковки материала  $\gamma$ : она тем меньше, чем больше  $\gamma$ . Равновесная концентрация ступенек на дислокациях зависит от вложенной энергии также по экспоненциальному закону [11]:

$$n_j \sim \exp(-E_j/kT). \quad (8)$$

4. Следовательно, при меньшей  $E_j$ , соответственно, большей ЭДУ, увеличивается концентрация ступенек; следовательно, увеличивается число образующихся на них вакансий и увеличивается скорость перестройки, связанная с переползанием дислокаций, отметим, что в этом случае винтовые дислокации более подвижны.

5. Также необходимо отметить, что, величина энергии дефекта упаковки определяет ширину расщепления дислокаций. Растянутая дислокация может скользить лишь в плоскости дефекта упаковки. Чтобы произошел переход из одной плоскости скольжения в другую, необходимо предварительное стягивание частичных дислокаций в единичную. Это осложняет поперечное скольжение и, следовательно, уменьшает скорость перестройки, особенно если энергия дефекта упаковки мала. В этом случае производство деформации происходит уже с бóльшим участием двойникования структуры.

Обозначенные выше аргументы подтверждают предложенный теоретическим инструментом и подтвержденный экспериментально факт лучшего сопротивления деформации сплава X30H60M9.

### Выводы

Одним из определяющих факторов, характеризующим кинетику перестройки структуры, стабильности структурно-фазового состояния, является показатель скорости (коэффициента) деформационного упрочнения, который пропорционален величине энергии дефекта упаковки. Для сравниваемых сплавов было установлено, что чем выше скорость затухания деформационного упрочнения при производстве общей деформации, тем стабильнее (прочнее) своим структурным состоянием остается материал сплава для одинаковых условий нагружения, что позволяет сделать вывод в пользу структурного состояния сплава X30H60M9. Структура сплава

Х30Н60М9 лучшим способом распределяет внешнее воздействие, участием большего количества систем скольжения, предлагая более устойчивое термодинамическое состояние в идентичных условиях испытаний.

Необходимо отметить, что теоретический результат более стабильного структурного состояния сплава Х30Н60М9, предложенный оценкой фотометрического параметра, был подтвержден экспериментальными данными, что доказывает возможность оценки кинетики структурного состояния однофазных металлических материалов параметрами видимого света, что предлагает новый, удобный, менее затратный инструмент неразрушающего контроля прогноза повреждаемости металлических конструкций, например, химических реакторов, где конструкционным материалом являются однофазные материалы.

### Список литературы

1. Слуцкер А. И. Формула Журкова // XV Петербургские Чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.: сборник тезисов. Санкт-Петербург. С. 3-4. URL: [http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya\\_2005.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya_2005.pdf) (Дата обращения: 06.04.2024).
2. Михайлов Д. Л. Патент № 2613805 Российская Федерация, МПК С22С 19/05 (2006.01), С22С 30/00 (2006.01). Коррозионно-стойкий сплав на основе никеля: № 2016105314: заявл. 02.17.2016: опубл. 02.03.2017. 3 с.
3. Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А., Кулагин С. П. Экспресс-анализ коррозионной стойкости сплавов системы Ni-Cr-Mo (Ni-Cr, Ni-Mo) согласно установленного количества тона в спектральной группе отраженного света // Вестник Новгородского государственного университета. 2023. 3 (132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480
4. Ермишкин В. А., Минина Н. А., Федотова Н. Л. Патент № 2387978 Российская Федерация, МПК G01N 21/55 (2006.01), G01N 25/05 (2006/01). Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности: № 2008150799/28: заявл. 12.23.2008: опубл. 04.22.2010 / заявитель Учреждение Российской академии наук Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. 4 с.
5. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515: взамен ГОСТ 1497-73 / разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР. Москва: Стандартиформ, 1986. 24 с.
6. Васильев Б. Е., Волков М. Е., Бредихина Е. Н., Плещеев И. И. Построение расчетных кривых деформирования в обеспечение наполнения банка данных по конструкционной прочности материалов авиационных двигателей // Materials Physics and Mechanics. 2019. 42 (5). 656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019\_19
7. Письмо-протокол АО «ЧМЗ» в адрес ИМЕТ РАН №19-101/1860-ИС, 07.02.2022.
8. Харин П. А., Зинченко Н. Г., Медведева Т. М., Шевакин А. Ф., Пантюхин А. П., Половов И. Б., Кабанов И. В. Эксплуатационные и технологические

свойства сплава ХН62М-ВИ // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. 3. 48-58.

9. Гиндин И. А., Неклюдов И. М., Оковит В. С., Старолат В. П., Дятлов В. П., Стратиенко В. А. Исследование влияния облучения высокоэнергетичными электронами (250 МэВ) на структуру и свойства алюминия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение: научно-технический сборник. 1974. 1 (1). 71-73.

10. Вотинов С. Н., Максимкин О. П. К вопросу о роли энергии дефекта упаковки в изменении структуры и свойств металлов и сплавов в результате радиационного и термического воздействия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение: научно-технический сборник. 2002. 3 (81). 23-30.

11. Пронина Л. Н., Мазилкин А. А., Аристова И. М. Исследование процессов разупрочнения в монокристаллических лентах вольфрама // Физика твердого тела. 1998. 40 (3). 498-502.

### References

1. Slutsker A. I. Formula Zhurkova [Zhurkov's Formula] // XV Peterburgskie Chteniya po problemam prochnosti [St. Petersburg Readings on Strength Problems]. Sankt-Peterburg, 12–14 aprelya 2005 g.: sbornik tezisov. Saint-Petersburg. P. 3-4. URL: [http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya\\_2005.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya_2005.pdf) (Accessed: 06.04.2024).

2. Mikhailov D. L. Patent RF RU № 2613805, MPK S22S 19/05 (2006.01), C22C 30/00 (2006.1). Korrozionno-stoikii splav na osnove nikele [Corrosion-resistant nickel-based alloy]: № 2016105314: decl. 02.17.2016: publ. 02.03.2017. 3 p.

3. Mikhailov D. L., Yermishkin V. A., Minina N. A., Kulagin S. P. Express analysis of the corrosion resistance of alloys of the Ni-Cr-Mo system (Ni-Cr, Ni-Mo) according to the set amount of tone in the reflected-light spectral group // Vestnik NovSU. 2023. 3 (132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480

4. Yermishkin V. A., Minina N. A., Fedotova N. L. Patent RF RU №2387978, MPK GO1N 21/55 (2006.01), GO1N 25/05 (2006/01). Sposob fotometricheskoi diagnostiki fazovikh prevrashchenii v tverdkh telakh po dannim analiza spektrov yarkosti otrazheniya sveta ot ikh poverkhnosti [A method for photometric diagnostics of phase transformations in solids based on the analysis of the brightness spectra of light reflection from their surface]: № 2008150799/28: decl. 12.23.2008: publ. 04.22.2010 / applicant is an institution of the Russian Academy of Sciences, the A. A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. 4 p.

5. GOST 1497-84. Metalli. Metodi ispitanii na rastyazhenie: mezhgosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 16.07.84 № 2515: vzamen GOST 1497-73 / razrabotan i vnesen Ministerstvom chernoj metallurgii SSSR. [Metals. Tensile testing methods: interstate standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Resolution of the USSR State Committee for Standards dated 07/16/84 No. 2515: instead of GOST 1497-73 / developed and introduced by the Ministry of Ferrous Metallurgy of the USSR] Moscow: Standartinform; 1986. 24 p.



6. Vasilev B. Ye., Volkov M. Ye., Bredikhina Ye. N., Pleshcheev I. I. Construction of stress-strain curves for aviation materials database formation // Materials Physics and Mechanics. 2019. 42 (5). 656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019\_19
7. Pismo-protokol AO «ChMZ» v adres IMET RAN [Protocol letter from ChMZ JSC to IMET RAS] №19-101/1860 -IC, 07.02.2022.
8. Kharin P.A., Zinchenko N.G. Medvedeva T.M., Shevakin A. F., Pantyukhin A. P., Polovov I. B., Kabanov I.V. Operational and technological properties of the CRNi62MO-VI alloy // Problemi chernoi metallurgii i materialovedeniya [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2019. 3. 48-58.
9. Gindin I. A., Neklyudov I. M., Okovit V. S., Starolat V. P., Dyatlov V. P., Stratienco V. A. Issledovanie vliyaniya oblucheniya visokoenergetichnimi elektronami (250 MeV) na strukturu i svoystva alyuminiya [Investigation of the effect of irradiation with high-energy electrons (250 MeV) on the structure and properties of aluminum] // Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnikh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie [Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science: scientific and technical collection]. 1974. 1 (1). 71-73.
10. Votinov S. N., Maksimkin O. P. K voprosu o roli energii defekta upakovki v izmenenii strukturi i svoystv metallov i splavov v rezultate radiatsionnogo i termicheskogo vozdeistviya [On the role of packaging defect energy in changing the structure and properties of metals and alloys as a result of radiation and thermal effects] // Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnikh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie [Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science: scientific and technical collection]. 2002. 3 (81). 23-30.
11. Pronina L. N., Mazilkin A. A., Aristova I. M. Softening Processes In Single-Crystal Tungsten Ribbons // Physics of the Solid State. 1998. 40 (3). 498-502.

#### Информация об авторах

*Михайлов Дмитрий Леонидович* – соискатель, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия); директор, ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-1609-840X, [ooopromkey@gmail.com](mailto:ooopromkey@gmail.com)

*Ермишкин Вячеслав Александрович* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9093-8294, [vermishkin@imet.ac.ru](mailto:vermishkin@imet.ac.ru)

*Минина Наталья Анатольевна* – старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-3782-3858, [minina@imet.ac.ru](mailto:minina@imet.ac.ru), [minina1951@rambler.ru](mailto:minina1951@rambler.ru)